

Leon Lederman,
Dick Teresi

BOSKA CZĄSTKA
Jeśli Wszechświat jest odpowiedzią, jak brzmi pytanie?

Przełożyła Elżbieta
Kołodziej-Józefowicz

1.	DRAMATIS PERSONAE	6
2.	Niewidoczna piłka nożna	7
	Jak działa Wszechświat?	8
	Początki nauki	8
	Pochwycenie Leona	9
	Biblioteka materii	13
	Kwarki i papier	13
	Niewidzialna piłka	14
	Piramida nauk	16
	Eksperymentatorzy i teoretycy: farmerzy, świnię i trufle	16
	Ci, którzy nie dosypiali	19
	Ratunku, matematyka!	19
	Wszechświat istnieje dopiero od 10^{18} sekund	21
	Opowieść o dwóch cząstkach i ostatecznej koszulce	22
	Tajemniczy pan Higgs	23
	Wieża i akcelerator	24
3.	Pierwszy fizyk cząstek	26
	Późną nocą z Ledermanem	29
	Patrzac w kalejdoskop	54
4.	Interludium A: Opowieść o dwóch miastach	56
5.	Poszukiwania atomu: mechanicy	57
	Galileusz, Zsa Zsa Gabor i ja	59
	Kule i pochylnie	60
	Piórko i grosik	61
	Prawda o wieży	62
	Atomy Galileusza	64
	Akceleratory i teleskopy	65
	Carl Sagan XVII wieku	66
	Człowiek bez nosa	67
	Mistyk wyjaśnia	69
	Papież do Galileusza: spadaj	71
	Słoneczna gąbka	72
	Zarządca mennicy	72
	Siła niech będzie z nami	74
	Ulubione F Isaaca	77
	Co nas pcha do góry	78
	Tajemnica dwóch mas	79
	Człowiek z dwoma umlautami	80
	Wielki twórca syntez	81
	Kłopot z grawitacją	83
	Isaac i jego atomy	83
	Dziwne rzeczy	84
	Dalmatyński prorok	86
6.	Dalsze poszukiwania atomu: chemicy i elektrycy	88
	Człowiek, który odkrył 20 centymetrów niczego	88
	Ściskanie gazu	89
	Zabawa w nazwy	90

Pelikan i balon.....	91
Z powrotem do atomu	93
Pasjans z pierwiastkami	96
Elektryczne żaby	98
Tajemnica wiązania chemicznego: znowu cząstki.....	99
Szok w Kopenhadze	100
Znowu déj vu	101
Świece, silniki, dynamo.....	101
Niech pole będzie z tobą	103
Z prędkością światła.....	105
Hertz na ratunek	107
Magnes i kulka	109
Pora do domu?.....	110
Pierwsza prawdziwa cząstka	111
7. Nagi atom	116
Gdy tęcza już nie wystarcza	118
Dowód rzeczowy nr 1: katastrofa w ultrafiolecie	120
Dowód rzeczowy nr 2: zjawisko fotoelektryczne	122
Dowód rzeczowy nr 3: kto lubi ciasto z rodzynkami?	124
Zmagania.....	128
Bohr: na skrzydłach motyla.....	129
Dwie minuty dla energii.....	131
No więc?.....	131
Uchylenie rąbka tajemnicy.....	134
Człowiek, który nie znał się na bateriach.....	135
Fale materii i dama w willi.....	136
Fala prawdopodobieństwa.....	138
Co to znaczy, czyli fizyka kroju i szycia.....	139
Niespodzianka na górskim szczycie.....	141
Nieoznaczoność i inne rzeczy	143
Utrapienie z podwójną szczeliną.....	144
Newton kontra Schrödinger	146
Trzy rzeczy, które trzeba zapamiętać o mechanice kwantowej	147
8. Interludium B: Tańczący mistrzowie wiedzy tajemnej.....	154
Pomruki rewolucji	157
9. Akceleratory: one rozkwaszają atomy, nieprawdaż?	161
Czy Bogini stwarza to wszystko w miarę postępu naszych badań?.....	163
Dlaczego aż tyle energii?	163
Szczelina.....	165
Umasywniacz	166
Katedra Moneta, czyli trzynaście sposobów widzenia protonu	166
Nowa materia: kilka przepisów.....	170
Cząstki z próżni.....	171
Wyścig.....	172
Wpływowa osobistość z Kalifornii	173
Wielka nauka i genius loci Kalifornii	176
Synchrotron: tyle okrążeń, ile chcesz.....	176

Ike i piony.....	178
Damy Beppa.....	179
Pierwsza wiązka zewnętrzna: przyjmujemy zakłady.....	180
Dygresja w stronę nauk społecznych: pochodzenie wielkiej nauki.....	182
Z powrotem do maszyn: trzy przełomy technologiczne.....	185
Czy większe jest lepsze?.....	188
Czwarty przełom: nadprzewodnictwo.....	189
Kowboj dyrektorem laboratorium.....	190
Dzień z życia protonu.....	191
Decyzje, decyzje: protony czy elektrony.....	193
Zderzenie czołowe czy tarcza?.....	194
Wytwarzając antymaterię.....	195
Zagładanie do czarnej skrzynki: detektory.....	199
Kłopoty z pęcherzykami.....	200
Czego się dowiedzieliśmy: akceleratory i postęp w fizyce.....	203
Trzy finały: wehikuł czasu, katedry i akcelerator na orbicie.....	205
10. Interludium C: Jak w ciągu weekendu złamaliśmy parzystość i... odkryliśmy Boga.....	209
Café Szanghaj.....	212
Eksperyment.....	216
11. A-tom!.....	224
ODDZIAŁYWANIE ELEKTRYCZNE.....	225
Cząstki wirtualne.....	226
Osobisty magnetyzm mionu.....	227
ODDZIAŁYWANIE SŁABE.....	230
Lekko złamana symetria, czyli skąd się wzięliśmy.....	232
Polowanie na małe neutralne.....	234
Wybuchowe równanie.....	235
Zbrodnicza spółka i dwuneutrinowy eksperyment.....	235
Brazylijskie zadłużenie, krótkie spódniczki i vice versa.....	240
ODDZIAŁYWANIE SILNE.....	242
Wołania kwarków.....	244
Zasady zachowania.....	246
Niobowe jaja.....	247
„Rutherford” wraca.....	248
Rewolucja Listopadowa.....	252
Poszukiwanie wybrzuszeń.....	253
Skąd to całe zamieszanie (i trochę kwaśnych winogron).....	256
Nagi powab.....	258
Trzecia generacja.....	260
JESZCZE O ODDZIAŁYWANIU SŁABYM.....	264
Pora na przyspieszenie oddechu.....	267
Znalezienie zet zero.....	270
JESZCZE O ODDZIAŁYWANIU SILNYM: GLUONY.....	271
Koniec drogi.....	275
12. I wreszcie Boska Cząstka.....	279
Wyjątki z agonii modelu standardowego.....	280
Ukryta prostota: upojenie modelem standardowym.....	282

Model standardowy A. D. 1980	282
Chimera unifikacji.....	283
Cechowanie	285
Wytropić W	287
Carlo i goryl	288
Przejażdżka na numerze 29	289
Triumf.....	291
Zwieńczenie modelu standardowego	292
O co tu chodzi?.....	293
Poszukiwania kwarka t.....	295
Model standardowy to chwiejna podstawa	296
I wreszcie.....	298
Kryzys masowy	299
Kryzys unitarności?.....	302
Kryzys Higgsa	303
Dygresja o niczym.....	305
Znaleźć Higgsa.....	306
Pustyniatron.....	306
Prezydent Reagan i superakcelerator: prawdziwa historia.....	308
13. Mikroprzestrzeń, makroprzestrzeń i czas przed początkiem czasu.....	312
Mikroprzestrzeń/makroprzestrzeń.....	313
Akcelerator z nieograniczonym budżetem	316
Teorie takie i siakie	317
GUT-y	318
Susy	320
Superstruny.....	321
Płaskość i ciemna materia	322
Charlton, Golda i Guth	323
Inflacja i cząstka skalarna.....	324
Przed początkiem czasu	327
Powrót Greka.....	329
Do widzenia.....	331
Koniec fizyki?	332
Obowiązkowe boskie zakończenie.....	333

1. DRAMATIS PERSONAE

Atomos lub a-tom - cząstka wymyślona przez Demokryta. A-tom, niewidoczny i niepodzielny, jest najmniejszym elementem materii. Nie należy go mylić z tak zwanym atomem chemicznym, będącym jedynie najmniejszą porcją każdego pierwiastka (wodoru, węgla, tlenu itd.).

Elektron - pierwszy a-tom, odkryty w 1898 roku. Elektron ma przypuszczalnie, podobnie jak wszystkie pozostałe a-tomy, zerowy promień. Należy do rodziny leptonów.

Kwark - kolejny a-tom. Istnieje sześć rodzajów (tak zwanych zapachów) kwarków. Każdy z sześciu kwarków występuje w trzech kolorach. Tylko dwa rodzaje kwarków: *u* górny i *d* dolny, istnieją naturalnie w dzisiejszym Wszechświecie.

Neutrino - a-tom należący do rodziny leptonów. Występuje w trzech odmianach. Nie jest cegiełką materii, ale odgrywa kluczową rolę w niektórych reakcjach. Bije wszelkie rekordy w minimalizmie: ma zerowy ładunek, zerowy promień i (wedle wszelkiego prawdopodobieństwa) zerową masę.

Mion i taon - leptony te są znacznie cięższymi kuzynami elektronu.

Foton, grawiton, rodzina W^+ , W^- i Z^0 oraz gluony - są to cząstki, ale nie cząstki materii jak kwarki i leptony. Przenoszą oddziaływania: elektromagnetyczne, grawitacyjne oraz jądrowe - słabe i silne. Jak dotąd wykryto wszystkie z nich oprócz grawitonu.

Pustka - nicość. Wymyślona także przez Demokryta. Jest przestrzenią, w której poruszają się atomy. Współcześni teoretycy zaśmiecali ją całym mnóstwem wirtualnych cząstek i różnych innych rupieci. Obecnie stosuje się nazwy „próżnia”, a niekiedy „eter” (zob. niżej).

Eter - wymyślony przez Isaaca Newtona, powtórnie wprowadzony do nauki przez Jamesa Clerka Maxwella. Eter to jest to, co wypełnia pustą przestrzeń Wszechświata. Skrytykowana i odrzucona przez Alberta Einsteina, koncepcja eteru obecnie powraca w postaci próżni zaśmieconej teoretycznie istniejącymi cząstkami.

Akcelerator - urządzenie służące do zwiększania energii cząstek. Ponieważ $E = mc^2$, akcelerator sprawia także, że cząstki stają się cięższe.

Eksperymentator - fizyk, który robi doświadczenia.

Teoretyk - fizyk, który nie robi doświadczeń.

Oraz

Boska Cząstka

(znana również jako cząstka Higgosa, bozon Higgosa, skalarny bozon Higgosa lub, po prostu, Higgs).

2. Niewidoczna piłka nożna

Nie istnieje nic oprócz atomów i pustej przestrzeni; wszystko poza tym jest opinią.
DEMOKRYT Z ABDERY

Na samym początku była próżnia; dziwny rodzaj pustki, nicłość nie zawierająca przestrzeni, czasu ani materii, żadnego światła ni dźwięku. Lecz prawa przyrody były już gotowe, a owa dziwna pustka kryła w sobie potencjał. Jak ogromny gład na wierzchołku wyniosłej skały...

Chwileczkę.

Zanim gład runie, powinienem wyjaśnić, że tak naprawdę nie bardzo wiem, o czym mówię. Wprawdzie każde opowiadanie powinno zaczynać się od początku, ale to jest opowiadanie o Wszechświecie i, niestety, nie mamy żadnych informacji o tym, co się działo na Samym Początku. Zupełnie żadnych, zero. Aż do momentu, kiedy Wszechświat osiągnął dojrzały wiek trylionowej części sekundy, czyli wkrótce po stworzeniu w akcie Wielkiego Wybuchu, nic o nim nie wiemy. Kiedy czytasz lub słyszysz coś na temat narodzin Wszechświata, bądź pewny, drogi Czytelniku, że autor zmyśla. Filozofowie mają prawo snuć domysły, lecz tylko Bóg wie, co się zdarzyło na Samym Początku, i - jak dotąd - skutecznie strzeże swej tajemnicy.

Ale na czym to stanęliśmy? Ach, tak...

Jak ogromny gład na wierzchołku wyniosłej skały... Równowaga pustki była równie krucha: wystarczyło najlżejsze zaburzenie, aby spowodować zmianę; zmianę, z której narodził się Wszechświat. I stało się. Nicłość eksplodowała. W potoku początkowej światłości stworzone zostały przestrzeń i czas.

Z uwolnionej wtedy energii wyłoniła się materia - gęsta plazma cząstek, które przekształcały się z powrotem w promieniowanie i znów stawały się materią. (Tu przynajmniej mamy już do czynienia z kilkoma faktami i spekulatywną teorią). Cząstki zderzały się ze sobą i dawały początek nowym cząstkom. Czas i przestrzeń wrzały i pieniały się, podczas gdy czarne dziury tworzyły się i znikwały. Co za widok!

W miarę jak Wszechświat rozszerzał się i stygł, stawał się także coraz rzadszy. Formowały się cząstki i różnicowały oddziaływania. Powstawały protony i neutrony, potem jądra atomowe i atomy oraz wielkie obłoki pyłu, które - wciąż się rozszerzając - zagęszczały się lokalnie to tu, to tam; w ten sposób tworzyły się gwiazdy, galaktyki i planety. Na jednej z planet - na zupełnie zwykłej planecie, krążącej wokół przeciętnej gwiazdy, która jest maleńkim punktem w spiralnym ramieniu typowej galaktyki - wyodrębniły się wyniosłe kontynenty i spienione oceany. W oceanach zachodziły reakcje organiczne, powstały białka i zaczęło się życie. Z prostych organizmów drogą ewolucji powstały rośliny i zwierzęta, aż wreszcie pojawiły się istoty ludzkie.

Ludzie wyróżniali się spośród innych istot żywych głównie tym, że byli ogromnie zainteresowani swoim otoczeniem. Z czasem mutacje doprowadziły do tego, że na Ziemi pojawił się dziwny rodzaj ludzi. Zachowywali się zuchwale. Nie zadowalało ich podziwianie wspaniałości świata. Pytali: „jak?” Jak został stworzony Wszechświat? Jak to, z czego jest zrobiony, może być odpowiedzialne za całe niewiarygodne bogactwo naszego świata: gwiazdy, planety, wydry, oceany, rafy koralowe, światło słoneczne, ludzki

mózg? Tylko dzięki pracy oraz poświęceniu setek pokoleń mistrzów i uczniów można było znaleźć odpowiedź na pytania stawiane przez mutantów. Wiele odpowiedzi było błędnych czy wręcz żenujących. Na szczęście jednak mutanci nie znali uczucia wstydu. Tych mutantów zwiemy fizykami.

Dziś, po dwóch tysiącach lat roztrząsania tego pytania - w kosmologicznej skali czasu jest to zaledwie mgnienie oka - zaczynamy pojmować całość historii stworzenia. W naszych teleskopach i mikroskopach, w obserwatoriach i w laboratoriach - i na kartkach naszych notatników - zaczynamy dostrzegać zarys pierwotnego piękna i symetrii, które panowały w pierwszych chwilach istnienia Wszechświata. Już prawie je dostrzegamy, choć obraz nie jest jeszcze wyraźny. Czujemy, że coś utrudnia nam widzenie - jakaś nieznaną siłą, która zamazuje i skrywa wewnętrzną prostotę naszego świata.

Jak działa Wszechświat?

Opowieść ta poświęcona jest pewnemu zagadnieniu, które zaprzętało naukę od czasów starożytnych: czym są elementarne cegiełki materii? Grecki filozof Demokryt najmniejszą cząstkę materii nazwał *atomos* (co dosłownie znaczy „niemożliwy do podzielenia”). Nie chodzi tu o te atomy, o których uczą na lekcjach chemii: wodór, hel, lit i inne, aż do uranu i jeszcze dalej. Wedle dzisiejszych kryteriów (i według kryteriów Demokryta) atomy to duże i niezgrabne twory. Dla fizyka, a i dla chemika także, taki atom to prawdziwy śmietnik pełen mniejszych cząstek: elektronów, protonów i neutronów. Z kolei protony i neutrony są jak gdyby wiaderkami pełnymi jeszcze innych stworków. Dlatego podstawowym składnikiem materii jest a-tom Demokryta, a nie atom nauczyciela chemii.

Materia, którą widzimy dziś wokół siebie, jest złożona. Istnieje około stu chemicznych atomów. Można obliczyć liczbę użytecznych kombinacji tych atomów - jest ona ogromna: miliardy miliardów. Niektóre rodzaje układów atomów, zwane cząsteczkami, natura wykorzystwała do budowy planet, słońc, gór, wirusów, gotówki, aspiryny, agentów literackich i innych pożytecznych rzeczy. Ale nie zawsze tak było. W najwcześniejszych momentach, tuż po stworzeniu Wszechświata w Wielkim Wybuchu, nie istniała złożona materia, jaką znamy obecnie. Nie było żadnych jąder, żadnych atomów, niczego, co składałoby się z prostszych składników. A to dlatego, że straszliwa temperatura panująca w nowo narodzonym Wszechświecie nie pozwalała na formowanie się żadnych złożonych obiektów. Jeśli takie powstawały w wyniku zderzeń, natychmiast z powrotem ulegały rozkładowi na najbardziej elementarne składniki. Istniał wtedy zapewne jeden rodzaj cząstek i jedno oddziaływanie (a może nawet jedno zunifikowane cząstko-oddziaływanie) oraz prawa fizyki. W tej pierwotnej jedności tkwiły zarodki złożoności świata, w którym na drodze ewolucji pojawili się ludzie, możliwe, że przede wszystkim po to, by myśleć o tych sprawach. Ten pierwotny Wszechświat może się komuś wydać nudnym, ale dla fizyka cząstek elementarnych - to były czasy! Cóż za prostota i piękno, nawet jeśli tylko mgliście i niedoskonale potrafimy je sobie wyobrazić.

Początki nauki

Jeszcze przed naszym bohaterem, Demokrytem, żyli inni greccy filozofowie, którzy próbowali wyjaśniać świat za pomocą racjonalnej argumentacji i rygorystycznie oddzielali od niej przesady, mity i podania o boskich interwencjach. Trzeba przyznać, że przesady, mity i podania pełniły ważną rolę w próbach znalezienia sobie miejsca w świecie pełnym wzbudzających grozę i najwyraźniej przypadkowych zjawisk. Jednak Grecy byli także pod silnym wrażeniem dającej się zauważyć regularności: powtarzalność dnia i nocy, pór roku, działania ognia, wiatru i wody. Już przed 650 r. p.n.e. w rejonie śródziemnomorskim dysponowano imponującą techniką. Wiedziano, jak dokonywać pomiarów łądu, jak żeglować wedle gwiazd. Znano wyrafinowane procesy metalurgiczne, wkrótce też zgromadzono szczegółową wiedzę dotyczącą położenia gwiazd i planet, która pozwalała na konstruowanie kalendarzy i formułowanie przewidywań. Wytwarzano zgrabne narzędzia oraz delikatne tkaniny, a wyroby ceramiczne miały kunsztowne kształty i zdobienia.

Na zachodnim wybrzeżu regionu zwanego dziś Turcją, w jednej z kolonii greckiego świata, gwarnym Milecie, po raz pierwszy wyrażono przekonanie, że pod powierzchnią widocznej złożoności świat jest prosty i że do prostoty tej można dotrzeć za pomocą logicznego rozumowania. Mniej więcej dwieście lat później Demokryt zaproponował *atomos* jako klucz, który miał umożliwić dotarcie do prostoty świata. I tak rozpoczęły się poszukiwania.

Fizyka wywodzi się z astronomii, gdyż najdawniejsi filozofowie z podziwem spoglądali na rozgwieżdżone niebo i poszukiwali logicznych modeli, które pozwoliłyby wyjaśnić konfiguracje gwiazd, ruchy planet oraz wschody i zachody Słońca. Z czasem uczeni zaczęli kierować swe zainteresowania ku Ziemi. Obserwacje zachodzących tu zjawisk - jabłek spadających z jabłoni, lotu strzały, rytmicznego ruchu wahadła, kierunków wiatrów i pływów morskich - pozwoliły sformułować zestaw „praw fizyki”.

Rozkwit fizyki przypadł na okres renesansu, kiedy (około roku 1500) stała się oddzielną i wyraźnie określoną dziedziną nauki. Z biegiem czasu i w miarę wzrastania naszych zdolności obserwacyjnych - wynalezienie mikroskopu, teleskopu, pomp próżniowych, zegarów i innych tym podobnych przyrządów - odkrywano coraz więcej zjawisk, które można opisać skrupulatnie notując liczby, zestawiając tabele i kreśląc wykresy. Wykonując te czynności, można z triumfem zauważyć, że zjawiska przebiegają w zgodzie z matematyką.

Na początku XX wieku atomy stanowiły granicę świata zbadanego przez fizykę, a w latach czterdziestych wysiłki badaczy skupiały się już na jądrze. Stopniowo coraz więcej zjawisk poddawało się obserwacjom. Dzięki wciąż doskonalonym przyrządom mogliśmy jeszcze dokładniej oglądać coraz mniejsze obiekty. Nowe obserwacje i pomiary stanowiły punkt wyjścia dla tworzonych syntez - zwartych podsumowań tego, co udało się zrozumieć. Każdy znaczący krok naprzód powodował powstanie nowej specjalizacji w obrębie fizyki. Niektórzy podążali „redukjonistyczną” drogą w kierunku dziedzin jądrowych i subjądrowych, podczas gdy inni wybierali ścieżkę wiodącą do pełniejszego zrozumienia atomów (fizyka atomowa), cząsteczek (fizyka molekularna i chemia), jąder atomowych (fizyka jądrowa) i tak dalej.

Pochwycenie Leona

Najpierw fascynowały mnie cząsteczki. W średniej szkole i na początku studiów uwielbiałem chemię, jednak stopniowo moje zainteresowania przesuwają się w kierunku fizyki, która wydawała mi się czystsza od chemii - bezwonna w gruncie rzeczy. Poza tym duży wpływ wywarli na mnie studenci fizyki, którzy byli zabawniejsi od chemików i lepiej grali w koszykówkę. Przewodził naszej grupie Isaac Halpern, obecnie profesor fizyki na Uniwersytecie Stanu Waszyngton. Twierdził, że chodzi oglądać wywieszony ocenę wyłączenie po to, by sprawdzić, czy dostał A z czubkiem czy z daszkiem¹. Wszyscy go uwielbialiśmy. Potrafił też skakać w dal lepiej niż ktokolwiek z nas.

Zacząłem interesować się zagadnieniami z dziedziny fizyki ze względu na ich niepodważalną logikę i wyraźne konsekwencje eksperymentalne. Gdy byłem na ostatnim roku studiów, mój przyjaciel ze szkoły średniej, Martin Klein, obecnie znakomity badacz spuścizny Einsteina na Uniwersytecie Yale, podczas długiego wieczoru przy wielu piwach wygłosił mi wykład o wyższości fizyki. To przesądziło sprawę. Wstąpiłem do woj-ska ze stopniem bakałarza w dziedzinie chemii i mocnym postanowieniem zostania fizykiem, o ile uda mi się przeżyć szkolenie i drugą wojnę światową.

Dla świata fizyki narodziłem się pod koniec 1948 roku, kiedy rozpocząłem studia doktoranckie. Pracowałem przy synchrociklotronie na Uniwersytecie Columbia. W owym czasie był to akcelerator o największej na świecie mocy. Dwight Eisenhower, prezydent uniwersytetu, przecinając wstęgę dokonał uroczystej inauguracji maszyny w czerwcu 1950 roku. Ponieważ przedtem pomogłem mu wygrać wojnę, władze uczelni bardzo mnie ceniły, płacąc mi prawie cztery tysiące dolarów rocznie - za 90 godzin pracy tygodniowo. To były ciężkie czasy.

W latach pięćdziesiątych synchrociklotron i inne podobne urządzenia przyczyniły się do powstania nowej dyscypliny - fizyki cząstek elementarnych.

Z punktu widzenia osoby postronnej najbardziej charakterystyczną cechą fizyki cząstek elementarnych jest sprzęt - narzędzia, jakimi się posługuje. Ja przyłączyłem się do badań w okresie, gdy właśnie wkraczaliśmy w wiek akceleratorów. Urządzenia te do dziś pełnią najważniejszą rolę w naszej pracy badawczej. Pierwszy „rozbijacz atomów” miał niewiele centymetrów średnicy. Obecnie akceleratorem o największej mocy jest urządzenie znajdujące się w Narodowym Laboratorium Akceleratorowym im. Enrico Fermiego (w tak zwanym Fermilabie) w Batawii, w stanie Illinois. Urządzenie to, zwane teatronem, ma około 6 km obwodu i rozpędza protony i antyprotony do bezprecedensowych energii. Około roku 2000 skończy się monopol teatronu na osiągnięcie najwyższych energii. Obwód nadprzewodzącego superakceleratora (Superconducting Super-Collider, czyli SSC), matki wszystkich akceleratorów, budowanego obecnie w Teksasie będzie miał 86,5 kilometra.²

Czasem zadajemy sobie pytanie, czy nie pobłądziliśmy gdzieś po drodze? Czy sprzęt nie stał się naszą obsesją? Czy fizyka cząstek elementarnych nie przekształciła się w tajemną cybernaukę, w której wielkie zespoły naukowców i megalityczne maszyny zajmują się zjawiskami tak abstrakcyjnymi, że nawet Bóg niezupełnie się w nich orientuje. Łatwiej będzie nam zrozumieć, jak do tego doszło, jeśli prześledzimy Drogę, która doprowadziła nas do obecnego stanu. Droga ta przypuszczalnie bierze swój początek w greckiej kolonii, Milecie, w 650 r. p.n.e., natomiast kończy się w mieście, w

¹ W amerykańskich szkołach stosuje się literową skalę ocen od A do F (przyp. tłum.).

² Budowa SSC została wstrzymana przez Kongres Stanów Zjednoczonych pod koniec 1993 roku (przyp. red.).

którym wszystko jest już zrozumiałe - gdzie najprostszy robotnicy, a nawet i sam burmistrz, wiedzą już, jak działa Wszechświat. Na przestrzeni wieków wielu podążało tą Droga: Demokryt, Archimedes, Kopernik, Galileusz, Newton, Faraday i inni, aż do Einsteina, Fermiego i licznych współczesnych Wędrowców.

Droga ma odcinki węższe i szersze; prowadzi przez rozległe pustkowia (jak autostrada nr 80 w stanie Nebraska), gdzie indziej robi się kręta i ruchliwa. Odchodzi od niej wiele bocznych ulic o kuszących nazwach: „elektronika”, „chemia”, „radiokomunikacja” czy „fizyka plazmy”. Ci, którzy je wybrali, sprawili, że zupełnie zmienił się sposób życia ludzi na naszej planecie. Ci, którzy pozostali wierni Drodze, przekonali się, że jest ona na całej swej długości jednakowo i wyraźnie oznakowana tablicami, na których widnieje napis: „Jak działa Wszechświat?” Przy tej właśnie Drodze znajdują się współczesne akceleratory.

Na Drogę tę wstąpiłem w Nowym Jorku, na skrzyżowaniu Broadwayu i 120. Ulicy. W tamtych latach problemy naukowe wydawały się jasno określone i bardzo istotne. Dotyczyły własności tak zwanego silnego oddziaływania jądrowego oraz pewnych przewidzianych przez teoretyków cząstek - mezonów π , znanych także jako piony. Akcelerator Uniwersytetu Columbia był tak zaprojektowany, by w wyniku bombardowania niewinnych tarcz protonami produkować jak najwięcej pionów. Przyrządy, którymi się wówczas posługiwaliśmy, były raczej proste; doktoranci bez trudu mogli pojąć zasady ich działania.

W latach pięćdziesiątych Uniwersytet Columbia był wylegarnią wielkich talentów fizycznych. Charles Townes miał wkrótce skonstruować laser i otrzymać Nagrodę Nobla. James Rainwater dostał Nagrodę Nobla za model jądra atomowego, a Willis Lamb za zmierzenie maleńkiego przesunięcia linii spektralnych widma wodoru. Noblista Isidor Rabi - na wielu z nas wywarł on ogromny wpływ - kierował zespołem, w którego skład wchodził między innymi Norman Ramsay i Polycarp Kusch; obaj w swoim czasie mieli zostać Laureatami. T. D. Lee uzyskał Nobla za teorię łamania parzystości. Zagęszczenie profesorów namaszczonego szwedzkimi świętymi olejkami było jednocześnie podniecające i przygnębiające. Wielu z nas, młodych pracowników naukowych, nosiło w klapie znaczek: „Jeszcze nie”.

Mój osobisty Wielki Wybuch uznania w środowisku naukowym wydarzył się w latach 1959-1962, gdy razem z dwoma kolegami po raz pierwszy zarejestrowaliśmy zderzenia wysokoenergetycznych neutrin. Neutrino to moje ulubione cząstki. Są pozbawione jakichkolwiek własności: nie mają masy (a jeśli, to bardzo niewielką), ładunku elektrycznego ani promienia, a na domiar złego nie podlegają silnym oddziaływaniom. Eufemistycznie bywają określane jako „ulotne”. Neutrino może przeniknąć przez miliony kilometrów litego ołowiu i szansa na to, że weźmie udział w dającym się zarejestrować zderzeniu, jest niewielka.

Nasz eksperyment z 1961 roku stał się kamieniem węgielnym teorii, która w latach siedemdziesiątych została nazwana „modelem standardowym” fizyki cząstek elementarnych. W 1988 roku eksperyment ten został uhonorowany przez Szwedzką Akademię Nauk Nagrodą Nobla. (Wszyscy mnie pytają, dlaczego czekali z tym 27 lat. Sam nie wiem. Rodzinie odpowiadałem żartobliwie, że Akademia ociągała się tak długo, bo nie mogła się zdecydować, które z moich licznych osiągnięć ma wyróżnić). Otrzymanie Nagrody Nobla jest oczywiście wielkim przeżyciem, ale żadną miarą nie da się go porównać z niewiarygodnym podnieceniem, które ogarnęło nas w momencie, gdy uświadomiliśmy sobie, że nasz eksperyment się powiódł.

Dziś fizycy odczuwają te same emocje, które towarzyszyły uczonym na przestrzeni wieków. Ich życie wypełnione jest niepokojem, bólem i trudnościami. Obfituje w napięcia, przyływy beznadziejności i zniechęcenia. Ale od czasu do czasu pojawiają się jasne chwile - radość, śmiech, triumf i uniesienie. Epifanie te przychodzą niespodziewanie. Często pojawiają się wówczas, gdy uda nam się zrozumieć coś nowego i ważnego, coś pięknego, co zostało odkryte przez kogoś innego. Jednak zwykli śmiertelnicy - do których należy większość znanych mi naukowców - przeżywają daleko słodsze chwile, gdy sami odkrywają jakąś nową prawdę o świecie. Zdziwiające, jak często zdarza się to około trzeciej nad ranem, gdy jesteś sam w laboratorium i nagle zdajesz sobie sprawę, że żaden osobnik z pozostałych pięciu miliardów ludzi na Ziemi nie wie tego, co wiesz ty. Taką przynajmniej żywisz nadzieję. Postarasz się, oczywiście, zawiadomić ich o tym jak najszybciej - nazywamy to „publikowaniem wyników”.

Wykład ten opowiada o łańcuchu nieskończonej łańcuchem słodkich chwil, które były udziałem uczonych na przestrzeni ostatnich dwu i pół tysiąca lat. Owocem tych przeżyć jest nasza obecna wiedza o Wszechświecie i jego mechanizmach. Ból i rozczarowanie także są częścią tej historii. Często opór i upór samej przyrody utrudniają rozwikłanie zagadki. Jednak uczone nie może liczyć na to, że wspaniałe chwile odkryć wypełnią mu całe życie. Powinien także czerpać radość ze zwykłych, codziennych czynności. Wielką przyjemność sprawia mi na przykład planowanie i konstruowanie urządzeń, które pozwalają dowiedzieć się więcej o tych nadzwyczaj abstrakcyjnych zagadnieniach.

Gdy byłem jeszcze nieopierzonym studentem, razem ze światowej sławy profesorem z Rzymu budowałem licznik cząstek. W pracy tej byłem nowicjuszem, a on starym mistrzem. Wspólnie wytoczyliśmy na tokarce mosiężny walec (było po piątej i wszyscy mechanicy już wyszli). Przylutowaliśmy do niego szklane zaślepki i przez krótką metalową izolowaną rurkę zatopioną w szkle przewlekliśmy złoty drucik. Potem znowu trochę polutowaliśmy. Przez kilka godzin specjalny gaz przepłykiwał nasz licznik, a my zajmowaliśmy się w tym czasie podłączaniem oscyloskopu do drucika, który za pośrednictwem kondensatora podłączyliśmy do źródła prądu o napięciu tysiąca woltów. Mój przyjaciel profesor, nazwijmy go Gilberto, bo tak właśnie miał na imię, spoglądał co chwila na zieloną linię w oscyloskopie i bezbłędnie łamaną angielszczyzną wykladał mi historię i ewolucję liczników cząstek. Nagle zeszywniał i zaczął dziko wykrzykiwać: *Mamma mia! Regardo incredibile! Primo securoso!* (Czy coś w tym rodzaju). Krzyczał, wymachiwał rękami, uniósł mnie w górę - mimo że byłem o 20 centymetrów wyższy i o dobre 25 kilogramów cięższy od niego - i wykonał ze mną taniec wokół pracowni.

- Co się stało? - wymamrotałem.

- *Mufiletto* - odpowiedział. - Jusz liczi. Jusz liczi.

Prawdopodobnie część tej sceny została odegrana tylko na mój użytek, ale Gilberta podnieciło to, że sami - za pomocą własnych rąk, używając naszych oczu i umysłów - skonstruowaliśmy urządzenie, które wykrywało przepływ promieni kosmicznych i rejestrowało je w postaci małych zygzaków na ekranie oscyloskopu. Choć niewątpliwie oglądał to zjawisko tysiące razy, nigdy mu nie spowszedniało. To, że jedna z tych cząstek, które trafiły do pracowni na dziesiątym piętrze budynku stojącego przy rogu Broadwayu i 120. Ulicy, mogła rozpocząć swoją wędrówkę wiele lat świetlnych temu w odległej galaktyce, tylko w części miało swój udział w naszej euforii. Niewyczerpany entuzjazm Gilberta był zaraźliwy.

Biblioteka materii

Kiedy opowiadam o fizyce cząstek elementarnych, często korzystam z uroczej metafory (trochę ją przy tym modyfikuję), której autorem jest Lukrecjusz, rzymski poeta i filozof. Przypuśćmy, że mamy za zadanie odkryć najbardziej elementarne składniki biblioteki. Jak się do tego zabrać? Moglibyśmy najpierw pomyśleć o podziale książek ze względu na rozmaite kategorie tematyczne: historia, nauki ścisłe, biografie itp. A może posortowalibyśmy je wedle rozmiaru: grube, cienkie, duże, małe. Rozważywszy wiele podobnych sposobów klasyfikacji, doszlibyśmy do wniosku, że książki są złożonymi obiektami i że łatwo można dokonać ich dalszego podziału. Zaglądamy więc do środka książki. Szybko rezygnujemy z podziału, którego kryterium stanowiłyby rozdziały, ustępy czy zdania, gdyż one same są złożonymi i nieeleganckimi składnikami. Słowa! Przypominamy sobie w tym momencie, że na stole przy wejściu leży gruby katalog zawierający wszystkie słowa występujące w bibliotece - słownik. Przestrzegając określonych reguł postępowania, zwanych gramatyką, możemy używać słów ze słownika, by zrekonstruować wszystkie książki znajdujące się w bibliotece. W każdej z nich te same słowa są używane i dopasowywane do siebie na różne sposoby. Ale słów jest tak wiele! Głębszy namysł doprowadziłby nas do liter, bo przecież słowa z nich się składają. No, wreszcie znaleźliśmy! Trzydzieści trzy litery pozwalają na stworzenie dziesiątków tysięcy słów, z których można złożyć miliony (miliardy?) książek. Musimy teraz wprowadzić dodatkowy zestaw reguł - ortografię - by ograniczyć ilość możliwych kombinacji liter. Gdyby nie wtrącił się w tym miejscu młodociany krytyk, moglibyśmy nawet próbować przedwcześnie opublikować nasze odkrycie. Młody krytyk powiedziałby, niewątpliwie wielce z siebie zadowolony: „Nie potrzebujesz aż tylu liter, dziadku, zero i jeden w zupełności wystarczą”. Dziś dzieci są już od kołyski otoczone cyfrowymi zabawkami i algorytmy komputerowe, zamieniające zera i jedynek na litery alfabetu, nie sprawiają im kłopotu. Jeśli jesteś na to za stary, drogi Czytelniku, to - być może - jesteś dość stary, by pamiętać alfabet Morse'a, złożony z kropek i kresek. Tak czy owak, mamy teraz następujący układ: zera i jedynek (albo kropki i kreski) wraz ze stosownym kodem, pozwalającym na utworzenie 33 liter, ortografię dla łączenia ich w słowa należące do słownika, gramatykę, by słowa układać w zdania, ustępy, rozdziały i wreszcie książki. A książki składają się na bibliotekę.

Jeśli nie ma już powodu poszukiwać głębszej struktury zera i jedynek, to znaczy, że odkryliśmy pierwotne, a-tomowe składniki biblioteki. W tym niedoskonałym porównaniu biblioteka przedstawia Wszechświat: gramatyka, ortografia i algorytm to siły przyrody, a zero i jeden to tak zwane kwarki i leptony, czyli nasi obecni kandydaci do miana demokrytyjskich a-tomów. Wszystkie te składniki są, oczywiście, niewidoczne.

Kwarki i papież

Dama z audytorium była nieustępliwa. „Czy kiedykolwiek widział pan jakiś atom?” - nalegała. Pytanie to, choć irytujące, jest w pełni zrozumiałe dla kogoś, kto zżył się z obiektywną rzeczywistością atomów. Bez trudu potrafię sobie wyobrazić ich wewnętrzną strukturę. Mogę przywołać obraz rozmytej chmury „obecności” elektronu, otaczającej maleńką kropeczkę jądra, które przyciąga do siebie ów mglisty obłok elektronowy. Te myślowe obrazy nie wyglądają jednakowo u różnych uczonych, ponieważ konstruuje je na własny użytek na podstawie równań matematycznych. Takie matematyczne recepty

nie są szczególnie pomocne, jeśli chodzi o zaspokojenie naszej zwykłej, ludzkiej potrzeby stworzenia sobie poglądowego wyobrażenia. Ale mimo to możemy „zobaczyć” atomy, protony, a nawet kwarki.

Próby odpowiedzi na podobne pytania zawsze zaczynam od określenia znaczenia słowa „widzieć”. Czy „widzisz” tę stronę, jeśli nosisz okulary? A gdy patrzysz na mikrofilm? Albo na kserokopię (okradając mnie przy tym z honorarium)? Gdy patrzysz na tekst na ekranie komputera? I wreszcie zdesperowany pytam: „Czy widziała Pani kiedykolwiek papieża?”

Odpowiedź zazwyczaj brzmi: „Oczywiście, widziałam go w telewizji”. Czyżby? Wszystko, co ta Pani widziała, to wiązkę elektronów padających na pomalowaną fosforem wewnętrzną powierzchnię ekranu. Dowody na istnienie atomu czy kwarka, jakimi dysponuję, są co najmniej równie dobre. Jakie dowody? Ślady cząstek w komorze pęcherzykowej. W akceleratorze znajdującym się w Fermilabie „odłamki” ze zderzeń protonów z antyprotonami są elektronicznie przechwytywane przez trzypiętrowy detektor wart 60 milionów dolarów. Tu „dowody” i „obraz” zbierane są przez dziesiątki tysięcy czujników wytwarzających impuls elektryczny, gdy przelatuje obok nich cząstka. Wszystkie te impulsy przekazywane są setkami tysięcy przewodów do elektronicznych urządzeń przetwarzających dane. Wreszcie na zwojach taśmy magnetycznej powstaje zapis zakodowany w postaci zer i jedynek. Na taśmach tych zarejestrowane są gwałtowne zderzenia protonów z antyprotonami, w których wyniku może powstać aż do siedemdziesięciu cząstek odlatujących w różne rejony detektora.

Nauka, a zwłaszcza fizyka cząstek elementarnych, nabiera zaufania do własnych wniosków, gdy możliwe jest powtórzenie wyników, które do nich doprowadziły. To znaczy, jeśli dane pochodzące z eksperymentu przeprowadzonego w Kalifornii są zgodne z danymi otrzymanymi z akceleratora innego typu, znajdującego się w Genewie. Także w sam eksperyment wbudowuje się sprawdziany i testy mające zapewnić, że urządzenie funkcjonuje tak, jak zaplanowano. Taką pewnością można osiągnąć w wyniku długiego i skomplikowanego procesu, w rezultacie badań prowadzonych od dziesięcioleci.

A jednak fizyka cząstek elementarnych przerasta wyobraźnię wielu ludzi. Nieustępliwa dama w audytorium nie jest odosobniona w swym zdumieniu, że oto cała banda uczonych ugania się za maleńkimi, niewidocznymi obiektami. Spróbujmy zatem uciec się do kolejnej metafory...

Niewidzialna piłka

Wyobraźmy sobie rasę inteligentnych mieszkańców planety Twilo. Wyglądają mniej więcej tak jak my, mówią podobnie do nas. Robią wszystko tak jak ludzie, z jedną tylko niewielką różnicą. Mają pewną szczególną wadę wzroku. Nie dostrzegają białoczerwonych obiektów. Nie widzą na przykład zebry ani koszulek sędziów na meczach hokejowych, ani piłki do gry w piłkę nożną. Pragnę tu zaznaczyć, że nie jest to jakaś niezwykła usterka. Ziemianie są jeszcze dziwniejsi. My mamy dwa dosłownie ślepe punkty mieszczące się w centrum pola widzenia. Nie widzimy tych dziur tylko dlatego, że mózg nauczył się ekstrapolować informacje pochodzące z całego pola widzenia: „zgaduje”, co powinno być w tym miejscu, i w ten sposób zapełnia brakujące fragmenty. Ludzie mkną autostradą z prędkością 160 km/h, dokonują chirurgicznych operacji mózgu, żon-

glują płonącymi pochodniami, chociaż część tego, co widzą, to - może i trafne - ale przecież tylko przypuszczenie.

Załóżmy więc, że na Ziemię przylatuje delegacja Twiloan z misją pokojową. Aby zapoznać ich z naszą kulturą, pokazujemy im między innymi jedno z najbardziej popularnych na naszej planecie wydarzeń: finałowy mecz piłki nożnej Mistrzostw Świata. Naturalnie, nie zdajemy sobie sprawy z tego, że nasi goście nie widzą białoczarnej piłki. Siedzą zatem na trybunach, a ich twarze mają uprzejmy, acz nieco skonsternowany wyraz. Oglądają, jak gromada ludzi w krótkich spodenkach biega po boisku w tę i z powrotem, wymachując bez sensu nogami, wpadając na siebie i nierzadko się wywracając. Co jakiś czas jeden z nich dmucha w gwizdek, a wówczas któryś z graczy biegnie do linii bocznej boiska i unosi obie ręce nad głowę, inni zaś mu się przyglądają. A już zupełnie rzadko bramkarz z nie wyjaśnionych przyczyn wywraca się na ziemię, zgromadzeni widzowie okazują wielką radość i czasem przyznaje się punkt jednej z drużyn.

Przez jakieś piętnaście minut Twiloanie siedzą zupełnie skonsternowani, potem dla zabicia czasu próbują zrozumieć zasady gry, która się przed nimi toczy. Niektórzy zajmują się klasyfikacją obserwowanych zdarzeń. Dedukują - częściowo na podstawie ubiorów graczy - że na boisku są dwa zespoły. Rejestrują ruchy graczy i odkrywają, że każdy z nich porusza się w określonym rejonie boiska. Stwierdzają, że różni gracze wykonują różne rodzaje ruchów. By nieco uporządkować swoje poszukiwania, Twiloanie, podobnie jak ludzie w analogicznej sytuacji, nadają nazwy poszczególnym pozycjom zajmowanym przez graczy. Następnie te pozycje kategoryzują i porównują, po czym w ogromnej tabeli zestawiają wszystkie odkryte cechy każdej z pozycji. Gdy Twiloanie odkrywają, że mają do czynienia z pewną symetrią: każdej pozycji w zespole A odpowiada kontrpozycja w zespole B, dochodzi do poważnego przełomu w ich rozważaniach.

Na dwie minuty przed końcem meczu Twiloanie mają tuziny wykresów, setki tabel i opisów oraz nieprzeliczone mnóstwo skomplikowanych reguł rządzących meczami piłki nożnej. I choć reguły te na swój ograniczony sposób mogą być poprawne, to żadna z nich nie ujmuje istoty gry. I wtedy właśnie pewien twiloański żółtodziób, siedzący dotąd cicho, mówi nieśmiało: „Przypuśćmy, że istnieje niewidoczna piłka”.

- Co takiego? - pytają starsi Twiloanie.

Podczas gdy starsi obserwowali to, co zdawało się wiązać z istotą gry - ruchy piłkarzy i oznaczenia boiska - żółtodziób wypatrywał rzadkich zdarzeń. I udało mu się: na moment przed tym, jak sędzia przyznawał punkt jednej z drużyn, i na ułamek sekundy przed wybuchem dzikiej radości na trybunach, młody Twiloanin dostrzegł trwające przez krótki moment wyrzucenie siatki bramki. W czasie meczu piłki nożnej zazwyczaj nie pada wiele goli, toteż można zaobserwować niewiele takich wyrzuceń, a każde z nich trwa tylko przez moment. Mimo to żółtodziobowi udało się dostrzec, że mają one półkolisty kształt. Stąd właśnie wzięła się jego szaleńcza konkluzja, że mecz piłki nożnej wymaga istnienia niewidzialnej (przynajmniej dla Twiloan) piłki.

Reszta delegacji wysłuchuje tej teorii i choć dowody empiryczne są niewystarczające, po dłuższej dyskusji przyznają, że młodzian może mieć rację. Starszy dyplomata w grupie - jak się okazuje fizyk - stwierdza, że rzadko występujące zdarzenia wnoszą czasem znacznie więcej niż tysiąc powszednich. Ale ostateczny i niepodważalny argument sprowadza się do tego, że piłka po prostu musi być. Przyjęcie, że istnieje piłka, której z niewiadomych przyczyn nie można zobaczyć, powoduje, że nagle wszystko zaczyna się

układać w logiczną całość. Gra nabiera sensu. Mało tego, wszystkie teorie, wykresy, diagramy i zestawienia sporządzone w ciągu tego popołudnia pozostają ważne. Piłka po prostu nadaje regułom sens.

Ta rozbudowana metafora ma zastosowanie dla wielu zagadek fizycznych, a szczególnie pasuje do fizyki cząstek elementarnych. Nie możemy zrozumieć reguł (praw przyrody), nie znając obiektów (piłka), a bez wiary w logiczny zestaw reguł nigdy nie zdołalibyśmy wydedukować istnienia wszystkich cząstek.

Piramida nauk

Mówimy tu o nauce i o fizyce, więc zanim ruszymy dalej, spróbujmy uściślić parę terminów. Kim jest fizyk i jak to, czym się zajmuje, ma się do wielkiego schematu nauk?

Istnieje wyraźna hierarchia dyscyplin naukowych, choć nie jest to uszeregowanie ze względu na wartość społeczną czy nawet wymagania intelektualne. Frederick Turner, humanista z Uniwersytetu Stanu Teksas, wyraził tę myśl nieco bardziej elokwentnie. Istnieje, jak mówi, piramida nauk. U jej podstawy znajduje się matematyka. Nie dlatego, że jest bardziej abstrakcyjna czy elegancka od innych, ale z tego powodu, że nie potrzebuje żadnych innych dziedzin i z nich nie korzysta. Natomiast fizyka, następna warstwa piramidy, jest uzależniona od matematyki. Wyżej tkwi chemia, która opiera się na osiągnięciach fizyki. W tym, trzeba przyznać, uproszczonym schemacie fizyka nie zajmuje się prawami rządzącymi chemią. Chemicy na przykład badają, w jaki sposób atomy łączą się w cząsteczki i jak te ostatnie się zachowują, gdy znajdują się blisko siebie. Oddziaływania między atomami są skomplikowane, ale ostatecznie sprowadzają się do praw przyciągania i odpychania między elektrycznie naładowanymi cząstkami, czyli do fizyki. Dalej mamy biologię, która czerpie z osiągnięć chemii i fizyki. Granice między wyższymi piętrami piramidy robią się coraz bardziej rozmyte i nieokreślone. Gdy dochodzimy do fizjologii, medycyny i psychologii, pierwotna hierarchia ulega rozmyciu. Na pograniczach nauk znajdują się dziedziny pośrednie: fizyka matematyczna, chemia fizyczna, biofizyka. Astronomię muszę jakoś wcisnąć do fizyki i nie mam pojęcia, co zrobić z geofizyką czy neurofizjologią. Stare powiedzonko pozwala następująco określić piramidę nauki: fizycy odpowiadają tylko przed matematykami, a matematycy - tylko przed Bogiem (choć pewnie nie byłoby łatwo znaleźć aż tak pokornego matematyka).

Eksperymentatorzy i teoretycy: farmerzy, świnie i trufle

Wszystkich fizyków zajmujących się cząstkami elementarnymi możemy podzielić na teoretyków i eksperymetatorów, zwanych także doświadczalnikami. Ja należę do tych ostatnich. Cała fizyka rozwija się dzięki współpracy i wzajemnemu oddziaływaniu tych dwóch grup. W tym odwiecznym miłośno-nienawistnym związku między teorią a eksperymentem trwa swego rodzaju rywalizacja. Ile ważnych odkryć eksperymentalnych zostało przewidzianych przez teorię? Ile zdarzyło się niespodzianek? Na przykład istnienie dodatnio naładowanego elektronu - pozytonu - zostało przewidziane przez teorię, podobnie jak piony, antyprotony i neutrino. Z kolei mion, taon i ypsilon stanowiły dla fizyków niespodziankę. Na podstawie bardziej dogłębnej analizy dochodzimy do wniosku,

że wynik tego śmiesznego współzawodnictwa jest z grubsza remisowy, ale któż by to liczył...

Eksperyment oznacza obserwację i pomiar. Wymaga stworzenia specjalnych warunków, zapewniających dokonanie najbardziej owocnych obserwacji i precyzyjnych pomiarów. Starożytni Grecy i współcześni astronomowie mieli ten sam wspólny problem: brak wpływu na zjawiska, które obserwują. Dawni Grecy nie mogli albo nie chcieli tego robić. Zupełnie satysfakcjonowało ich prowadzenie obserwacji. Astronomowie natomiast zapewne byliby szczęśliwi, gdyby mogli rąbnąć jedną gwiazdą o drugą albo, jeszcze lepiej, zderzyć ze sobą dwie galaktyki. Niestety, nie mają jeszcze takich możliwości i na razie muszą się zadowolić doskonaleniem metod obserwacji. Ale my mamy mnóstwo sposobów obserwowania własności naszych cząstek.

Dzięki akceleratorom możemy zaprojektować eksperymenty mające na celu znalezienie nowych cząstek. Możemy sterować cząstkami tak, by padały na jądra atomowe, i odczytywać pojawiające się w następstwie zderzeń odchylenia ich torów w ten sam sposób, w jaki specjaliści od kultury mykeńskiej rozszyfrowują pismo linearne - jeśli tylko zdołamy złamać kod. Produkuje cząstki, a potem je obserwujemy, by zobaczyć, jakie mają własności.

Istnienie nowej cząstki można uznać za przewidziane wtedy, gdy wynika ono z syntezy dostępnych danych dokonanej przez jakiegoś bystrego teoretyka. Najczęściej okazuje się, że nowa cząstka nie istnieje i uszczerbek ponosi ta konkretna teoria. Czy odejdzie w niepamięć, czy też nie, zależy głównie od odporności i wytrwałości teoretyka. Rzecz w tym, że wykonuje się dwa rodzaje eksperymentów: takie, które mają dostarczyć danych potwierdzających teorię, i takie, które mają badać nowe, nieznanne obszary. Oczywiście, zazwyczaj najwięcej zabawy jest z obalaniem teorii. Jak to kiedyś napisał Thomas Huxley: „Wielka tragedia nauki - piękna hipoteza ginie uśmiercona przez brzydki fakt”. Dobre teorie wyjaśniają to, co już jest wiadome, i przewidują rezultaty przyszłych eksperymentów. Wzajemne oddziaływanie teorii i eksperymentu to jedna z wielu radości, jakich dostarcza fizyka cząstek elementarnych.

Niektórzy z wybitnych eksperymentatorów - na przykład Galileusz, Kirchhoff, Faraday, Ampère, Hertz, Thomsonowie (J. J. i G. P.) oraz Rutherford - byli także wcale kompetentnymi teoretykami. Ale eksperymentator-teoretyk to ginący gatunek. W naszych czasach chlubnym wyjątkiem był Enrico Fermi. I. I. Rabi wyraził kiedyś swą troskę z powodu pogłębiającej się przepaści między specjalizacjami w fizyce, mówiąc, że europejscy doświadczalnicy nie potrafią dodać słupka liczb, a teoretycy nie są w stanie zasnuwać sobie butów. Obecnie mamy więc dwie grupy fizyków, którym przyświeca wspólny cel - zrozumienie Wszechświata - ale różniące się znacznie światopoglądem, umiejętnościami i stylem pracy. Teoretycy późno przychodzą do pracy, uczęszczają na wyczerpujące sympozja gdzieś na wyspach greckich lub alpejskich szczytach, biorą prawdziwe urlopy, znacznie częściej przychodzą do domu na tyle wcześnie, by jeszcze zdążyć wynieść śmieci. Mają tendencję do zamartwiania się bezsennością. Podobno pewien teoretyk skarżył się lekarzowi: „Doktorze, proszę mi pomóc! Śpię dobrze całą noc, raniem jest nie najgorzej, ale po południu nie mogę zmrużyć oka”. Takie zachowanie dało początek niesprawiedliwej charakterystyce, zawartej w książce *The Leisure of the Theory Class*, bestsellerze Thorsteina Veblena.

Doświadczalnicy nie przychodzą późno do pracy - oni po prostu nie zdążyli pójść do domu. W okresie intensywnej pracy laboratoryjnej świat zewnętrzny przestaje dla nich istnieć i bez reszty oddają się badaniom. Sypiają wtedy, gdy mają godzinę czasu, by

zwinąć się w kłębek gdzieś na podłodze koło akceleratora. Teoretyk może przeżyć całe życie nie doznając intelektualnych wyzwień stojących przed eksperymentatorem, nie doświadczając żadnych wzruszeń i niebezpieczeństw: dźwigu przenoszącego nad głową dziesięciotonowy ładunek, migających czaszek i piszczeli, napisów: „Uwaga! Promieniowanie!” Jedyne prawdziwe niebezpieczeństwo, jakie zagraża teoretykowi podczas pracy, wiąże się z tym, że może się on dźgnąć ołówkiem, kiedy atakuje robala wypełniającego z obliczeń. Moja postawa wobec teoretyków to mieszanina zazdrości i strachu, lecz także szacunku i tkliwości. Teoretycy są autorami wszystkich najpopularniejszych książek o fizyce: Heinz Pagels, Frank Wilczek, Stephen Hawking, Richard Feynman i inni. Zresztą, czemuż by nie? Mają przecież tyle wolnego czasu... Teoretycy bywają aroganccy. Podczas moich rządów w Fermilabie uroczyście ostrzegłem naszą grupę teoretyków, by nie zachowywali się arogancko. Przynajmniej jeden z nich poważnie potraktował moje słowa. Nigdy nie zapomnę przypadkiem usłyszonej modlitwy unoszącej się z jego gabinetu: „Boże, proszę, przebac mi mój grzech arogancji. Przez arogancję rozumiem...”

Teoretycy, podobnie jak wielu innych naukowców, bywają dziko, czasem absurdalnie przejęci rywalizacją. Inni z kolei są pełni wewnętrznego spokoju; rozgrywki, w które angażują się zwykli śmiertelnicy, wyraźnie ich nie dotyczą. Enrico Fermi jest tego klasycznym przykładem. Ten wielki włoski fizyk nigdy nie dał poznać po sobie, że rywalizacja ma dla niego jakiegokolwiek znaczenie. Podczas gdy przeciętny fizyk powiedziałby: „My zrobiliśmy to pierwsi”, Fermi chciał tylko poznać szczegóły. Jednak kiedyś na plaży na Long Island, niedaleko laboratorium w Brookhaven, pokazałem mu, jak potrafię modelować realistyczne posągi z wilgotnego piasku. Natychmiast zaproponował, byśmy urządzili zawody, kto zrobi piękniejszy akt leżący. (Odmawiam podania rezultatów. Ocena zależy od tego, czy jest się zwolennikiem śródziemnomorskiej szkoły rzeźbiarskiej czy szkoły z Pelham Bay¹).

Pewnego razu, gdy uczestniczyłem w jakiejś konferencji, spotkałem Fermiego w kolejce po obiad. Będąc pod ogromnym wrażeniem obecności wielkiego człowieka, zapytałem go, co sądzi o przedstawionych właśnie danych dotyczących cząstki K -zero-dwa. Przyglądał mi się przez chwilę, a potem rzekł: „Młody człowieku, gdybym potrafił zapamiętać te wszystkie nazwy, zostałbym botanikiem”. Wielu fizyków powtarzało tę historyjkę, ale to mi się ona przydarzyła. Teoretycy bywają pełnymi ciepła i entuzjazmu istotami, z którymi eksperymetatorzy (my, prości hydraulicy i elektrycy) uwielbiają prowadzić konwersacje i od nich się uczyć. Miałem wielkie szczęście wieść długie rozmowy z niektórymi wybitnymi teoretykami naszych czasów - z Richardem Feynmanem, z jego kolegą z California Institute of Technology (czyli Caltech) Murrayem Gell-Mannem, z arcyteksańczykiem Stevenem Weinbergiem i moim rywalem żartownisiem Shellym Glashowem. James Bjorken, Martinus Veltman, Mary Gaillard i T. D. Lee to inni wielcy, z którymi miałem przyjemność przebywać, uczyć się od nich i wspólnie z nimi się wygłupiać. Znaczna część moich eksperymentów została zainspirowana przez artykuły tych uczonych i rozmowy, które z nimi odbyłem. Zdarzają się także znacznie mniej przyjemni w obejściu teoretycy. Ich geniusz zmacony jest dziwnym brakiem poczucia bezpieczeństwa. Na ich widok chce się zawołać tak, jak Salieri w filmie *Amadeusz*: „Dlaczego, Boże, zamknąłeś tak znakomitego kompozytora w ciele kretyna?”

¹ Część nowojorskiej dzielnicy Bronx (przyp. tłum.).

Teoretycy zazwyczaj osiągają szczytową formę w bardzo młodym wieku; ich soki twórcze, jak się zdaje, tryskają bardzo wcześnie i zaczynają wysychać po piętnastym roku życia. Zapewne muszą wiedzieć tyle, ile trzeba; w młodym wieku nie mają jeszcze zbędnego balastu intelektualnego.

Niewątpliwie teoretykom niezasłużenie przypisuje się część zasług za dokonanie pewnych odkryć. Sekwencję „teoretyk, eksperymentator, odkrycie” porównywano czasem do sekwencji „farmer, świnia, trufle”. Farmer prowadzi świnie w okolice, gdzie, być może, rosną trufle. Świnia wytrwale ich szuka, wreszcie znajduje, a gdy zamierza je pożyć, farmer zabiera je dla siebie.

Ci, którzy nie dosypiali

W następnych częściach zajmę się historią i przyszłością materii, widzianymi oczyma odkrywców, podkreślając przy tym - nie ponad miarę, mam nadzieję - rolę eksperymentatorów. Wyobrazimy sobie Galileusza wspinającego się na szczyt krzywej wieży w Pizie i spuszczonego na drewnianą platformę dwa różne ciężarki, aby sprawdzić, czy słycać jedno, czy dwa uderzenia. Pomyślimy o Fermim, który wraz ze swymi współpracownikami doprowadził do pierwszej samopodtrzymującej się jądrowej reakcji łańcuchowej pod płytą boiska stadionu uniwersyteckiego w Chicago.

Kiedy mówię o bólu i trudnościach, w które obfituje życie naukowca, mam na myśli coś więcej niż tylko niepokoje egzystencjalne. Kościół potępił prace Galileusza. *Madame Curie-Skłodowska* życiem przypłaciła swe odkrycia - stała się ofiarą leukemii wywołanej przez promieniowanie. Zbyt wielu z nas cierpi na kataraktę, a żaden nie wysypia się należycie. Większość z tego, co wiemy o Wszechświecie, wiemy dzięki facetom (i damom), którzy nie dosypiali.

Osiągnięcia teoretyków, oczywiście, także są częścią historii poszukiwań a-tomu. Pomagają nam przetrwać to, co Steven Weinberg nazwał „ciemnymi okresami, które rozdzielają eksperymentalne przełomy” i doprowadzają „niemal niepostrzeżenie do zmiany dotychczasowych przekonań”. Słynna książka Weinberga, *Pierwsze trzy minuty*, to jeden z lepszych, choć obecnie już nieco przestarzały popularnonaukowy opis narodzin Wszechświata w Wielkim Wybuchu. (Zawsze uważałem, że dzieło to sprzedawało się tak znakomicie, gdyż ludzie brali je za poradnik życia seksualnego). W mojej książce będę kładł nacisk na kluczowe pomiary dotyczące atomu, ale nie sposób mówić o danych nie zahaczając o teorię. Jakie znaczenie mają te wszystkie pomiary?

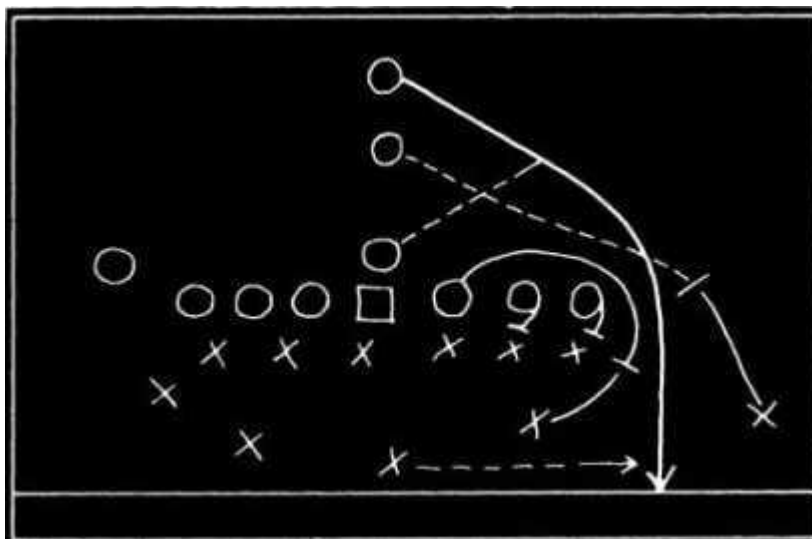
Ratunku, matematyka!

Będziemy musieli porozmawiać o matematyce. Nawet eksperymentator nie może przejść przez życie bez znajomości kilku równań i liczb. Nie możemy zupełnie uciec od matematyki, bo byłoby to tak, jakby antropolog nie chciał studiować języka ludności, którą opisuje, albo jakby badacz twórczości Szekspira nie nauczył się angielskiego.

Matematyka jest tak ściśle wpleciona w tkankę nauki - zwłaszcza fizyki - że wykluczenie jej równałoby się pozbawieniu nauki części jej piękna, zwięzłości sformułowań i rytualnej szaty. Na poziomie praktycznym matematyka pomaga wyjaśnić, jak przebiega

rozwój idei, jak działają urządzenia, jak wszystko to razem składa się na jedną całość. Spotykasz jakąś liczbę tu, potem tę samą liczbę gdzieś indziej - kto wie, może są jakoś ze sobą powiązane.

Ale nie trać ducha, drogi Czytelniku. Nie zamierzam dokonywać obliczeń i na końcowym egzaminie też nie będzie żadnych zadań matematycznych. Podczas wykładu, jaki prowadziłem dla humanistów na Uniwersytecie w Chicago (nosił on tytuł *Mechanika kwantowa dla poetów*), omijałem problem, wskazując na matematykę i mówiąc o niej, ale, broń Boże, nie dokonując w obecności studentów żadnych obliczeń. Ale i tak przekonałem się, że abstrakcyjne symbole na tablicy automatycznie stymulują organ wydzielający soki, które nadają oczom szklisty wyraz. Jeśli na przykład napisałem $x = vt$ (czytaj *iks równa się fau razy te*), studentom zapierało dech. I nie chodziło tylko o to, że te genialne dzieci rodziców płacących chesne w wysokości dwudziestu tysięcy dolarów rocznie nie są w stanie poradzić sobie z $x = vt$. Podaj im tylko liczby do podstawienia za x oraz t i poproś o rozwiązanie równania ze względu na v , a 48 procent rozwiąże równanie poprawnie, 15 procent po zasięgnięciu porady prawnika odmówi podania odpowiedzi, a 5 procent odkrzyknie: „Obecny!” (Tak, wiem, że to w sumie nie daje 100 procent, ale w końcu jestem przecież doświadczałnikiem, a nie teoretykiem. Poza tym, takie głupie pomyłki wykładowcy poprawiają studentom samopoczucie). Studentów zbija z tropu sama świadomość, że mam zamiar mówić o matematyce. Jest ona dla nich czymś nowym i wywołuje najwyższy niepokój. Toteż, by odzyskać szacunek i życzliwość swoich studentów, czym prędzej przechodzę do bardziej znanego im i bezpiecznego zagadnienia.



Wyobraźmy sobie Marsjanina, który przygląda się temu diagramowi i próbuje go zrozumieć. Łzy mu trysną z pępka! Natomiast przeciętny kibic futbolu amerykańskiego, który nie skończył nawet szkoły średniej, zawoła: „Toż to słynny atak na linię bramki drużyny Czerwonoskórych z Waszyngtonu”. Czyżby zatem ten schemat zagrywki był prostszy niż $x = vt$? W gruncie rzeczy jest tak samo abstrakcyjny, a z pewnością znacznie bardziej umowny. Równanie $x = vt$ można zastosować wszędzie, w całym Wszechświecie, natomiast ten manewr Czerwonoskórych może pomógłby im zdobyć punkty w Detroit czy Buffallo, ale nigdy podczas gry przeciw Niedźwiedziom.

Dlatego myśląc o równaniach musimy pamiętać o tym, że mają one realne znaczenie, podobnie jak schematy rozgrywek futbolowych - choć są zbyt skomplikowane i nieeleganckie - mają realne znaczenie na boisku. Tak naprawdę, od zdolności manipulowania równaniem $x = vt$ ważniejsze jest, by je odczytać jako stwierdzenie, mówiące coś o Wszechświecie, w którym żyjemy. Zrozumieć $x = vt$, to osiągnąć moc. Będziesz mógł, Czytelniku, przepowiadać przyszłość i odczytywać przeszłość. Cóż więc ono znaczy?

X mówi nam, gdzie się coś znajduje. Tym czymś może być Harry sunący w swym porsche po autostradzie albo elektron wypadający z akceleratora. Gdy $x = 16$, oznacza to, że Harry albo elektron znajdują się w odległości 16 jednostek miary od miejsca, oznaczonego przez nas jako zero. V mówi nam, jak prędko Harry (czy elektron) się porusza. Harry może mknąć po autostradzie z prędkością 120 km/h, a elektron może się wlec z prędkością 1 000 000 m/s. T określa czas, jaki minął od chwili, gdy ktoś zawołał „start!” Możemy teraz przewidzieć, gdzie się znajdzie to nasze coś w dowolnym momencie: czy $t = 3$ sekundy, czy 16 godzin, czy 100 000 lat. Możemy także określić, gdzie nasze coś było w chwili $t = -7$ sekund (7 sekund przed $t = 0$) albo w chwili $t = -1\,000\,000$ lat. Innymi słowy, jeśli Harry wyrusza sprzed twojego domu i jedzie dokładnie w kierunku wschodnim z prędkością 130 km/h, to oczywiście po godzinie od startu będzie się znajdował 130 km na wschód od ciebie. I na odwrót, zakładając, że jego prędkość zawsze wynosi v i że v jest znane, można także obliczyć, gdzie Harry był godzinę wcześniej. Założenie dotyczące stałości v jest bardzo istotne, bo jeśli na przykład Harry lubi wypić, to mógł już godzinę wcześniej zatrzymać się w barze.

Richard Feynman w inny sposób przedstawiał subtelność tego równania. Według jego wersji, policjant zatrzymuje panią jadącą samochodem, podchodzi do niej i mówi: „Czy pani wie, że jechała pani z prędkością 120 km na godzinę?” Na co ona: „Niech pan nie będzie śmieszny, przecież wyruszyłam z domu zaledwie przed kwadransem!” Feynmanowi wydawało się, że wymyślił humorystyczne wprowadzenie do rachunku różniczkowego. Jakież było jego zdziwienie, gdy oskarżono go o dyskryminację kobiet. Dlatego ja nie opowiadam tego dowcipu.

Celem naszej małej wycieczki do krainy matematyki było przekonanie się, że równania mają rozwiązania i że te rozwiązania mogą być porównywane z „rzeczywistym światem” pomiarów i obserwacji. Jeśli konfrontacja taka wypadnie pomyślnie, wzrasta nasze zaufanie do „prawa”, z którego skorzystaliśmy. Czasem jednak okazuje się, że rozwiązanie nie zgadza się z wynikami pomiarów i obserwacji. Wtedy, po odpowiednim sprawdzeniu i skontrolowaniu, „prawo” ląduje na śmietniku historii. Od czasu do czasu zdarza się, że rozwiązania równań wyrażających prawa przyrody przybierają całkiem nieoczekiwaną i dziwną postać, przez co zdają się podawać w wątpliwość całą teorię. Jeśli kolejne obserwacje wykazują, że teoria jest trafna, radujemy się. Jednak niezależnie od losów poszczególnych teorii mamy pewność, że ogólne prawdy o Wszechświecie, a także funkcjonowanie elektrycznego układu rezonansowego czy drgania stalowej belki budowlanej, dają się wyrazić w języku matematyki.

Wszechświat istnieje dopiero od 10^{18} sekund

Jeszcze jedna uwaga w sprawie liczb. Przedmiot naszych rozważań często zmusza nas do przeskakiwania ze świata bardzo małych obiektów do świata olbrzymich ciał, dlatego też będziemy mieli do czynienia zarówno z bardzo małymi, jak i bardzo wielkimi liczbami. Najczęściej będę je podawał w przyjętej w nauce notacji. Na przykład zamiast pisać jeden milion jako 1 000 000, przedstawię tę liczbę w postaci 10^6 , co oznacza dziesięć podniesione do szóstej potęgi, czyli jeden z sześcioma zerami; w przybliżeniu odpowiada to wyrażonemu w dolarach kosztowi funkcjonowania federalnego rządu amerykańskiego przez 20 sekund. Wielkie liczby, które nie zaczynają się od 1, także można zapisywać w podobny sposób. Na przykład 5 500 000 przedstawiamy jako $5,5 \times 10^6$. Jeśli zaś chodzi o małe liczby, to po prostu przed wykładnik potęgi wstawiamy minus. Jedną milionową ($1/1\,000\,000$) zapisuje się tak: 10^{-6} , co oznacza, że jeden znajduje się na szóstym miejscu po przecinku: 0,000001.

Ważne jest, by zdać sobie sprawę z rzędu wielkości tych liczb. Jedną z wad notacji liczb stosowanej w naukach ścisłych jest to, że ukrywa ona ich prawdziwy ogrom (albo znikomość). Zakres spotykanych w nauce odcinków czasowych jest oszołamiający. 10^{-1} sekundy to mgnienie oka, 10^{-6} sekundy to czas życia mionu, 10^{-23} sekundy to czas potrzebny fotonowi, cząstce światła, na przejście przez jądro atomowe. Trzeba pamiętać o tym, że wzrastające potęgi dziesięciu bardzo szybko zwiększają liczbę. Tak więc 10^7 sekund to trochę więcej niż cztery miesiące, a 10^9 sekund to już trzydzieści lat. Wiek Wszechświata określa się na 10^{18} sekund - tyle czasu upłynęło od Wielkiego Wybuchu. Fizycy mierzą ten wiek w sekundach - tyle że w bardzo wielu.

Czas nie jest jedyną wielkością, której zakres rozciąga się od niewyobrażalnie małego do niesłychanie wielkiego. Najmniejsza odległość, jaką potrafimy dziś zmierzyć to 10^{-17} cm. Jest to droga, jaką przebywa cząstka, zwana Z^0 , zanim opuści nasz świat. Teoretycy mają czasem do czynienia z jeszcze mniejszymi strukturami przestrzennymi, gdy na przykład mówią o superstrunach - należących do modnej ostatnio, ale bardzo abstrakcyjnej i hipotetycznej teorii cząstek elementarnych. Twierdzą mianowicie, że rozmiar strun wynosi 10^{-35} cm - to naprawdę bardzo mało. Na przeciwległym krańcu skali jest promień Wszechświata: nieco powyżej 10^{28} cm.

Opowieść o dwóch cząstkach i ostatecznej koszulce

Gdy miałem dziesięć lat, zachorowałem na odrę. Aby mnie rozweselić, ojciec kupił mi wydrukowaną dużą czcionką książkę Alberta Einsteina i Leopolda Infelda, zatytułowaną Ewolucja fizyki. Nigdy nie zapomnę początku tej książki; autorzy mówili w nim o powieściach detektywistycznych i o tym, że w każdej z nich jest zagadka, trop i detektyw. Detektyw rozwiązuje zagadkę dzięki wskazówkom naprowadzającym go na trop.

W naszej opowieści mamy dwie zagadki do rozwiązania. Obie przejawiają się w postaci cząstek. Pierwsza z nich to poszukiwany od dawna a-tom, niewidoczna, niepodzielna cząstka materii, której istnienie po raz pierwszy postulował Demokryt. A-tom należy do sedna podstawowych pytań stawianych przez fizykę cząstek elementarnych. Przez 2500 lat zmagaliśmy się z tą zagadką. Dysponujemy tysiącami wskazówek, z których każdą odkrywano w pocie czoła. W pierwszych częściach tej książki będziemy śledzić, jak nasi poprzednicy trudzili się nad złożeniem tej układanki. Ze zdumieniem spostrzeżemy, że wiele „nowoczesnych” idei formułowano już w XVI i XVII wieku, a nawet na parę stuleci przed Chrystusem. Na zakończenie powrócimy do teraźniejszości,

poszukując rozwiązania drugiej, może nawet trudniejszej zagadki. Dotyczy ona cząstki, która, moim zdaniem, dyryguje kosmiczną symfonią. Podczas lektury tego wykładu zauważysz, drogi Czytelniku, pewne pokrewieństwo łączące szesnastowiecznego matematyka, który spuszczał ciężarki z wieży w Pizie, ze współczesnym fizykiem, odmrażającym sobie palce w zimnej szopie na smaganej wichrem prerii podczas sprawdzania danych płynących z wartego pół miliarda dolarów akceleratora ukrytego pod zamrożoną ziemią. Obaj zadawali sobie te same pytania: Jaka jest podstawowa struktura materii? Jak działa Wszechświat?

Gdy dorastałem w Bronxie, uwielbiałem obserwować mego brata, który godzinami bawił się chemikaliami. Był geniuszem. Wyręczałem go we wszystkich domowych obowiązkach, byle tylko pozwolił mi przyglądać się swoim eksperymentom. Teraz mój brat jest biznesmenem. Sprzedaje różne dziwne rzeczy, takie jak poduszki, które piszczą, kiedy się na nich siada, tablice rejestracyjne i koszulki z zabawnymi napisami. Te ostatnie pozwalają ludziom wyrazić swój światopogląd w krótkim stwierdzeniu, mieszczącym się na piersi. Cel nauki jest nie mniej szczytny: mam ambicję dożyć chwili, gdy całą fizykę będzie można zredukować do wzoru tak prostego i eleganckiego, że bez trudu zmieści się na koszulce.

W ciągu stuleci poszukiwań takiej ostatecznej koszulki poczyniliśmy znaczne postępy. Na przykład Newton wymyślił grawitację, siłę, która pozwala wyjaśnić zadziwiająco szeroki wachlarz zjawisk: pływy morskie, spadanie jabłka, ruchy planet, formowanie się galaktyk. Napis na newtonowskiej koszulce brzmi: $F = ma$. Później Michael Faraday i James Clerk Maxwell rozwiązali zagadkę widma elektromagnetycznego. Stwierdzili, że elektryczność, magnetyzm, światło słoneczne, fale radiowe i promienie Roentgena są przejawami tej samej siły. W każdej przyzwoitej księgarni uniwersyteckiej można znaleźć koszulkę ozdobioną równaniami Maxwella. Dziś, wiele cząstek później, dysponujemy już modelem standardowym, który redukuje całą rzeczywistość do około tuzina cząstek i czterech rodzajów oddziaływania. Model standardowy stanowi syntezę wszystkich danych uzyskanych za pomocą wszystkich akceleratorów, począwszy od krzywej wieży w Pizie. Porządkuje on cząstki, zwane kwarkami i leptonami (po sześć z każdego rodzaju), w eleganckiej tabeli. Cały model standardowy można zmieścić na koszulce, choć musiałaby być dość gęsto zadrukowana. Jest to prostota zdobyta z wielkim trudem przez zastępy fizyków podążających tą samą Drogą. Jednak elegancja modelu standardowego jest tylko pozorna. Zadziwiająco dokładnie opisuje on niektóre zjawiska, ale jednocześnie jest niepełny i wewnętrznie niespójny. Nawet na koszulce rozmiaru XL nie zmieściłyby się wszystkie - nawet bardzo zwięźle ujęte - niejasne punkty tego modelu.

Co lub kto stoi nam na drodze, utrudniając poszukiwania doskonałej koszulki? Wracamy tu do naszej drugiej zagadki. Zanim zakończymy dzieło rozpoczęte przez starożytnych Greków, musimy dopuścić taką możliwość, że ktoś rozsiewa fałszywe poszlaki, aby nas zdezorientować. Czasem, jak w powieści szpiegowskiej Johna le Carré, eksperymentator musi zastawić pułapkę, ażeby w ten sposób doprowadzić do zdemaskowania winnego.

Tajemniczy pan Higgs

Fizycy pracują obecnie nad zastawieniem takiej właśnie pułapki. Budujemy kołowy tunel o obwodzie około 86 km, mający pomieścić podwójny układ próżniowych rur nadprzewodzącego superakceleratora (SSC), w którym zamierzamy pochwycić naszego złoczyńcę.

A jakież to złoczyńca! Największy złoczyńca wszechczasów! Wierzmy, że istnieje jakaś posępna obecność, przepełniająca cały Wszechświat, która uniemożliwia nam zrozumienie prawdziwej natury materii. Jak gdyby ktoś lub coś chciało nam przeszkodzić w zdobyciu ostatecznej wiedzy. Niewidzialna bariera, która nas od niej oddziela, zwana bywa polem Higgsa. Jego lodowe macki sięgają do każdego zakątka Wszechświata, a jego naukowe i filozoficzne implikacje wywołują u fizyków gęsią skórę. Pole Higgsa wykonuje swoje czarnoksiężskie sztuczki za pomocą - czegoż by innego - cząstki. Zwiemy ją bozonem Higgsa. Bozon Higgsa jest głównym powodem, dla którego budujemy w Teksasie nadprzewodzący superakcelerator. Albowiem tylko on będzie dysponował energią niezbędną do wyprodukowania i wykrycia bozonu Higgsa - tak w każdym razie sądzimy. Ów bozon ma tak wielkie znaczenie dla stanu dzisiejszej fizyki, jest tak kluczowy dla naszego rozumienia struktury materii i tak nieuchwytny, że nazwałem go Boską Cząstką. Dlaczego? Z dwóch powodów. Po pierwsze, wydawca nie zgodziłby się na tytuł *Piekielna Cząstka*, choć możliwe, że to byłaby nawet trafniejsza nazwa, biorąc pod uwagę jej złośliwą naturę i wydatki, jakie przez nią ponosimy. A po drugie, opowieść ta jest w pewien sposób związana z inną, znacznie starszą księgą...

Wieża i akcelerator

Mieszkańcy całej Ziemi mieli jedną mowę, czyli jednakowe słowa. A gdy wędrowali ze wschodu, napotkali równinę w kraju Szinear i tam zamieszkali.

I mówili jeden do drugiego: „Chodźcie, wyrabiamy cegłę i wypalajmy ją w ogniu”. A gdy już mieli cegłę zamiast kamieni i smołę zamiast zaprawy murarskiej, rzekli: „Chodźcie, zbudujemy sobie miasto i wieżę, której wierzchołek będzie sięgał nieba, i w ten sposób uczynimy sobie znak, abyśmy się nie rozproszyli po całej ziemi”.

A Pan zstąpił z nieba, by zobaczyć to miasto i wieżę, które budowali ludzie, i rzekł: „Są oni jednym ludem i wszyscy mają jedną mowę i to jest przyczyną, że zaczęli budować. A zatem w przyszłości nic nie będzie dla nich niemożliwe, cokolwiek zamierzają uczynić. Zejdźmy więc i pomieszajmy ich język, aby jeden nie rozumiał drugiego!”

W ten sposób Pan rozproszył ich stamtąd po całej powierzchni ziemi, i tak nie dokończyli budowy tego miasta. Dlatego to nazwano je Babel, tam bowiem Pan pomieształ mowę mieszkańców całej ziemi.¹

Rdz. 11,1-9

Niegdyś, wiele milleniów temu, na długo zanim zapisano te słowa, przyroda miała jedną mowę i materia wszędzie była jednakowa - piękna w swej eleganckiej, rozzarzanej symetrii. Jednak w ciągu eonów przekształciła się i rozproszyła we Wszechświecie

¹ *Biblia tysiąclecia*, Poznań 1980.

pod wieloma postaciami, konfundując tych, którzy żyją na zwyczajnej planecie krążącej wokół przeciętnej gwiazdy.

W dziejach ludzkich poszukiwań racjonalnego wytłumaczenia świata zdarzały się okresy obfitujące w przełomy, gdy postęp był szybki, a uczeni pełni optymizmu. Kiedy indziej panował zupełny zamęt. Często okresy największego pomieszania, kryzysu intelektualnego i całkowitego braku zrozumienia stanowiły zwiastuny nadchodzących przełomów, niosących oświecenie.

Przez ostatnich parę dekad panował wśród fizyków cząstek elementarnych taki dziwny stan zamętu intelektualnego, że porównanie do wieży Babel wydaje się być jak najbardziej na miejscu. Używając wielkich akceleratorów, fizycy poddawali drobiazgowej analizie cząstki i procesy zachodzące we Wszechświecie. W ostatnich latach do poszukiwań dołączyli astronomowie i astrofizycy, spoglądający w ogromne teleskopy i przeszukujący niebiosa, by znaleźć szczątkowe iskry i popioły pozostałe z eksplozji, która, wedle ich przekonania, wydarzyła się 15 miliardów lat temu i zwana jest Wielkim Wybuchem.

Obie te grupy naukowców dążą do osiągnięcia prostego, spójnego, wszechobejmującego modelu, który pozwoliłby na wyjaśnienie wszystkiego: struktury materii i energii, zachowania oddziaływań w warunkach tak różnych, jak najwcześniejsze chwile młodego Wszechświata, z panującymi wtedy przeogromnymi temperaturami i gęstością, i stosunkowo zimny i pusty świat jaki znamy dzisiaj. Podążaliśmy tym tropem gładko, może zbyt gładko, gdy natknęliśmy się na osobliwość - najwyraźniej nieprzyjazną siłę działającą we Wszechświecie. Na coś, co wydaje się wyzierać z przestrzeni, w której osadzone są nasze planety, gwiazdy i galaktyki. Jest to coś, czego nie potrafimy jeszcze zidentyfikować i co, można powiedzieć, znalazło się tu, by nas wypróbować i pomieszać nam szyki. Czy zbliżyliśmy się do czegoś nadmiernie? Czy jest gdzieś ukryty jakiś nerwowy Czarnoksiężnik z Krainy Oz, który niechlujnie fałszuje dane archeologiczne?

Chodzi o to, czy fizycy się poddadzą, czy też, w przeciwieństwie do nieszczęsnych Babilończyków, będziemy kontynuowali budowę wieży i, jak to ujął Einstein, „poznamy umysł Boga”.

Cały Wszechświat miał wiele rodzajów mowy, czyli różne słowa. A gdy wędrowali ze wschodu, napotkali równinę w okolicy Waxahachie i tam zamieszkali. I mówili jeden do drugiego: „Chodźcie, zbudujemy sobie wielki akcelerator, w którym zderzenia mogą sięgać daleko w przeszłość, aż do początku czasu”. I mieli nadprzewodzące magnesy do zakrzywiania i protony do rozbijania.

A Pani zstąpiła z nieba, by zobaczyć ten akcelerator, który zbudowali ludzie. I rzekła: „Oto ludzie rozplątują to, com zaplątała”. I Pani westchnęła i rzekła: „Zejdźmy więc i dajmy im Boską Cząstkę, aby mogli zobaczyć, jak piękny jest Wszechświat, który uczyniłam”.

Zupełnie Nowy Testament 11, 1-7

3. Pierwszy fizyk cząstek

Wydawał się zaskoczony. „Znalazłeś nóż do odkrawania atomów?
- zapytał. - W tym mieście?” Skinąłem głową.

„Siedzimy właśnie na jego głównej części” - powiedziałem.

Z PRZEPROSINAMI DLA HUNTERA S. THOMPSONA

Każdy może wjechać (albo wejść, albo wbiec) do Fermilabu, mimo że jest to jedno z najbardziej wyrafinowanych laboratoriów naukowych na świecie. Większość obiektów federalnych jest strzeżona bardzo skrupulatnie, ale zadanie Fermilabu to odkrywanie sekretów, a nie ich utrzymywanie. W latach sześćdziesiątych Komisja Energii Atomowej zaleciła Robertowi R. Wilsonowi, mojemu poprzednikowi na stanowisku dyrektora i założycielowi laboratorium, by opracował plan postępowania na wypadek, gdyby przy bramach pojawili się demonstrujący studenci. Wilson miał prosty plan: powiedział Komisji, że zamierza przywitać demonstrantów w pojedynkę, uzbrojony jedynie w wykład z fizyki. Broń ta jest na tyle śmiertelna, zapewniał, że na pewno rozproszy nawet najbardziej zaciekłych awanturników. Do dziś kolejni dyrektorzy laboratorium mają na podorędziu przygotowany specjalny wykład do wygłaszania w nagłych wypadkach. Módlmy się, byśmy nigdy nie musieli go użyć.

Fermilab zajmuje 7 tysięcy akrów pola rozciągającego się w odległości 8 km od Batawii, mniej więcej godzinę jazdy samochodem na zachód od Chicago. Przy wejściu na tereny laboratorium od ulicy Pine znajduje się ogromna stalowa rzeźba. Zaprojektował ją Robert Wilson, człowiek, który był nie tylko pierwszym dyrektorem Fermilabu, ale osobą odpowiedzialną także za jego budowę i twórcą artystycznego, architektonicznego oraz naukowego sukcesu laboratorium. Rzeźba zatytułowana *Złamana symetria* składa się z trzech łuków, które zakrzywiają się ku górze, by spotkać się w jednym punkcie na wysokości 18 metrów nad ziemią. Jednak nie udaje im się ta sztuka, w każdym razie niezupełnie. Ramiona stykają się, ale niemal w całkowicie przypadkowy sposób, jak gdyby budowało je trzech ludzi, którzy nie porozumiewali się ze sobą. Rzeźba sprawia wrażenie jakiegoś nieudanego tworu - nie inaczej niż nasz obecny Wszechświat. Można obejść ją dookoła i z każdej strony ta stalowa struktura wygląda rażąco niesymetrycznie. Dzieło sztuki Wilsona znakomicie pasuje do Fermilabu, ponieważ do zakresu obowiązków zatrudnionych tam fizyków należy poszukiwanie śladów ukrytej symetrii w świecie, który sprawia wrażenie bardzo asymetrycznego.

Nieco dalej w głąb terenów należących do laboratorium znajduje się najokazalsza budowla całego zespołu: szesnastopiętrowy centralny budynek laboratoryjny, zwany Wilson Hall. Strzela on w górę z płaskiej równiny, przypominając Dürerowski rysunek dłoni wzniesionych w modlitwie. Projekt tego budynku powstał z inspiracji bryłą katedry w Beauvais, której budowę przerwano w 1225 roku. Składa się ona z dwóch jednakowych wież połączonych prezbiterium. Wilson Hall, który został wzniesiony w 1972 roku, tworzą dwie wieże (ręce wzniesione w geście modlitewnym) połączone na wysokości paru pięter przejściami i jednym z największych w świecie atriów. Przy wejściu do wieży znajduje się sadzawka, a nad jej brzegiem - wysoki obelisk, ostatnie dzieło ofiarowane laboratorium przez Wilsona; nazywane jest Ostatnią Budowlą Wilsona. Stycznie do Wilson Hall położony jest *raison d'être* całego kompleksu - akcelerator cząstek. Dziesięć metrów pod powierzchnią preri ukryta jest rura ze stali nierdzewnej o przekroju zaledwie kilkunastu centymetrów, zakreślająca okrąg o obwodzie 6,5 km. Przechodzi przez

tysiące nadprzewodzących elektromagnesów, które prowadzą protony po kolistym torze. Z prędkością bliską prędkości światła protony zmierzają po okręgu ku anihilacji w czołowym zderzeniu ze swymi braćmi - antyprotonami. Zderzenia te powodują chwilowy wzrost temperatury do 10 tysięcy bilionów (10^{16}) stopni, znacznie wyższej od temperatur spotykanych w jądrze naszego Słońca lub w gwałtownym wybuchu supernowej. Naukowcy, którzy tu pracują, są podróżnikami w czasie w znacznie bardziej dosłownym sensie niż ci, których przygody można oglądać w filmach fantastycznonaukowych. Ostatni raz tak wysokie temperatury występowały powszechnie w maleńkim ułamku sekundy po Wielkim Wybuchu.

Choć ukryty pod powierzchnią ziemi, akcelerator jest bardzo dobrze widoczny z góry, ponieważ usypano bezpośrednio nad nim sześciometrowy wał ziemny. (Wyobraź sobie, drogi Czytelniku, bardzo cienki obwarzanek o obwodzie 6,5 km). Niektórzy przypuszczają, że wał ten absorbuje promieniowanie z akceleratora, ale tak naprawdę jest tam tylko po to, by zadowolić poczucie estetyki Wilsona. Włożywszy tyle pracy w budowę akceleratora, był mocno zawiedziony, gdy nie mógł nawet dokładnie pokazać ludziom, gdzie on właściwie się znajduje. Dlatego, kiedy robotnicy wykopali doły na stawy z wodą potrzebną do chłodzenia urządzeń, Wilson zarządził, aby uformowali z ziemi ten ogromny kolisty wał. Dla zaakcentowania okręgu Wilson wybudował wokół niego szeroki na trzy metry kanał i zainstalował pompy wyrzucające w powietrze silne strumienie wody. Kanał ten pełni nie tylko funkcję ozdobną, gdyż dostarcza również wodę potrzebną do chłodzenia akceleratora. Całość jest przedziwnie piękna. Na zdjęciach satelitarnych, robionych z wysokości 500 km, dokładnie widać wał i kanał; zataczają one idealny okrąg i stanowią najbardziej wyrazisty rys krajobrazu północnego Illinois.

Sześćset sześćdziesiąt akrów terenu opasanego kręgiem akceleratora tworzy ciekawy dodatek do placówki badawczej. Laboratorium stara się przywrócić pierwotnie porastającą te tereny roślinność preriową. W ciągu ostatnich dwustu lat wysoka trawa preriowa została niemal całkowicie wyparta przez gatunki przybyłe z Europy. Nasiona udało nam się uzyskać dzięki pracy kilkuset ochotników, którzy zbierali je na pozostałych w okolicach Chicago skrawkach prerii. Duże łabędzie amerykańskie, gęsi kanadyjskie i żurawie wydmowe znalazły dom nad jeziorcami pstrzącymi wewnątrz okręgu.

Po drugiej stronie drogi, na północ od głównego okręgu, realizowany jest kolejny program przywracania środowiska do stanu naturalnego: znajduje się tam pastwisko, po którym spaceruje stado bizonów liczące około stu sztuk. Zwierzęta te pochodzą głównie z Kolorado i Południowej Dakoty. Jest nawet kilka osobników z Illinois, choć bizony nie miały się tu najlepiej już od ośmiuset lat. Przedtem powszechnie występowały na prerii, po której dziś przechadzają się fizycy. Archeolodzy twierdzą, że na terenie obecnego Fermilabu polowania na bizony odbywały się już przed dziewięcioma tysiącami lat, na co wskazują groty strzał znajdowane w okolicy. Wygląda na to, że myśliwi z indiańskiego szczepu, osiadłego nad pobliską Fox River, przybywali tu, rozkładali obóz, polowali na zwierzynę i ze zdobyczą powracali do domu.

Dzisiejsze bizony wywołują u niektórych ludzi lekki niepokój. Gdy pewnego razu brałem udział w programie telewizyjnym Phila Donahue, z którym rozmawiałem na temat prac prowadzonych w laboratorium, zatelefonowała dama mieszkająca w pobliżu Fermilabu. „Według słów doktora Ledermana, akcelerator wydaje się stosunkowo nieszkodliwy - stwierdziła. - Jeśli tak, to dlaczego trzymają tam te bizony? Wszyscy wiemy, że są bardzo wrażliwe na promieniowanie radioaktywne”. Myślała, że bizony to takie kopalniane kanarki, tyle że przyuczono je do wykrywania promieniowania, a nie tlenu

węgla. Chyba wyobrażała sobie, że ze swego gabinetu w wieży zawsze jednym okiem obserwuję bizony, gotów w każdej chwili rzucić się do ucieczki, gdyby któryś z nich nagle się wyrócił. Tak naprawdę bizony są tylko bizonami. Licznik Geigera jest znacznie lepszym detektorem promieniowania i zużywa o wiele mniej siana.

Kiedy jedzie się dalej na wschód ulicą Pine, widać kilka innych ważnych budynków. Między innymi budynek detektora zderzeń (*Collider Detector Facility*, w skrócie CDF), w którym mamy gromadzić jak największą liczbę danych w naszych badaniach nad materią, oraz nowo wybudowane Centrum Komputerowe, nazwane imieniem zmarłego niedawno wielkiego teoretyka z California Institute of Technology (Caltech), Richarda P. Feynmana. Podążając dalej w tym samym kierunku, dojeżdżamy do Eola Road. Tu skręcamy w prawo i po przebyciu około dwóch kilometrów po lewej stronie ukaże się naszym oczom farma licząca około 150 lat. Tam właśnie mieszkałem, pełniąc funkcję dyrektora Fermilabu: 137 Eola Road. Nie jest to oficjalny adres; sam postanowiłem oznaczyć dom tym numerem.

W rzeczy samej był to pomysł Feynmana, aby fizycy wywieszali w swych domach i pracowniach znak, który przypominałby im o tym, jak mało jeszcze wiedzą. Treścią tego znaku miało być właśnie „137”. Sto trzydzieści siedem jest odwrotnością liczby, zwanej stałą struktury subtelnej. Ma ona związek z prawdopodobieństwem emisji lub absorpcji fotonu przez elektron. Liczbę tę oznacza się także literą α i można ją otrzymać dzieląc kwadrat ładunku elektronu przez prędkość światła pomnożoną przez stałą Plancka. Cały powyższy słowotok znaczy tyle, że ta jedna liczba - 137 - łączy w sobie elektromagnetyzm (ładunek elektronu), teorię względności (prędkość światła) i mechanikę kwantową (stała Plancka). Czuliśmy się nieco pewniej, gdyby związek między tymi ważnymi wielkościami liczbowymi wynosił jeden lub trzy, albo jakąś wielokrotność liczby π . Ale 137?

Najbardziej niezwykły aspekt tej tajemniczej liczby polega na tym, że jest ona bezwymiarowa. Większość liczb występuje w towarzystwie jakichś jednostek. Prędkość światła wynosi 300 000 km/s, Abraham Lincoln miał 195 cm wzrostu. Jednak okazuje się, że w trakcie obliczeń prowadzących do otrzymania α wszystkie jednostki się redukują. Wychodzi samo 1/137. Ta naga liczba pojawia się to tu, to tam. Innymi słowy, zarówno uczeni z Marsa, jak i z czternastej planety Syriusza, używając dowolnych jednostek, jakie mogliby przyjąć dla oznaczenia ładunku elektronu, prędkości światła i swojej wersji stałej Plancka, także otrzymają po prostu 137.

Fizycy głowią się nad znaczeniem 137 od pięćdziesięciu lat. Werner Heisenberg stwierdził kiedyś, że gdy wreszcie uda się wyjaśnić zagadkę 137, wszystkie pozostałe problemy mechaniki kwantowej będą rozwiązane. Swoim studentom zawsze radzę, aby sporządzili tablicę z liczbą 137 i trzymali ją wysoko w ruchliwym miejscu, jeśli kiedykolwiek wpadną w kłopoty w obcym mieście gdziekolwiek w świecie. Na pewno jakiś fizyk dojrzy ich w tłumie, zrozumie, że są w tarapatkach, i pospieszy im z pomocą. (O ile wiem, nikt tego jeszcze nie próbował, lecz jestem przekonany, że powinno zadziałać).

Jedna ze wspaniałych (acz nie potwierdzonych) anegdot podkreśla znaczenie 137, ukazując jednocześnie arogancję teoretyków. Otóż Wolfgang Pauli, słynny austriacki uczyony, z pochodzenia Szwajcar, poszedł do nieba i w nagrodę za zasługi dla fizyki został uhonorowany audiencją u Bogini, która rzekła: „Możesz zadać jedno pytanie. Co chciałbyś wiedzieć?” Pauli z miejsca zadał pytanie dotyczące problemu, nad którym pracował na próżno przez ostatnich dziesięć lat życia: „Dlaczego α równa się 1/137?”

Bogini uśmiechnęła się, wzięła kawałek kredy i zaczęła pisać na tablicy równania. Po paru minutach odwróciła się do Pauliego, który machnął ręką i stwierdził: *Das ist falsch!* (Bzdura!)

Jest też i prawdziwa, w pełni sprawdzalna historia, która wydarzyła się tu, na Ziemi. Myśl o liczbie 137 rzeczywiście nie dawała Pauliemu spokoju; spędził niezliczone godziny rozważając jej znaczenie. Prześladowała go do samego końca. Gdy asystent odwiedził Pauliego w szpitalu tuż przed operacją, po której wkrótce zmarł, uczony zwrócił uwagę na numer pokoju szpitalnego. Pokój miał numer 137.

Tak więc tam mieszkałem: 137 Eola Road.

Późną nocą z Ledermanem

Gdy wracałem kiedyś w *weekendową* noc z późnej kolacji w Batawii, wybrałem drogę do domu prowadzącą przez tereny laboratorium. Z kilku miejsc leżących przy Eola Road widać było na tle gwiazdzistego nieba migoczący światłami centralny budynek. Wilson Hall w niedzielę o wpół do dwunastej w nocy stanowi żywe świadectwo tego, jak poważnie fizycy podchodzą do rozwiązywania zagadek Wszechświata. Światła jarzyły się na każdym z szesnastu pięter w bliźniaczych wieżach. Na każdym z pięter czuwało kilku fizyków o ciężkich powiekach, którzy próbowali rozpracować szczegóły naszych mętnych teorii dotyczących energii i materii. Ja na szczęście mogłem jechać do domu. Mój udział w pracy na nocnej zmianie został drastycznie zredukowany - będąc dyrektorem mogłem sobie pozwolić na to, by przespać się z jakimś problemem, zamiast nad nim pracować. Byłem wdzięczny losowi, że mogłem tej nocy wyciągnąć się w wygodnym łóżku, zamiast koczować przy akceleratorze w oczekiwaniu na nowe dane. Nie mogłem jednak zasnąć, obracałem się z boku na bok, martwiłem się i rozmyślałem o kwarkach, Ginie, leptonach, Sophii... W końcu zacząłem liczyć owce, by przestać myśleć o fizyce: ...134, 135, 136, 137...

Nagle podniosłem się z pościeli i, wiedziony głębokim poczuciem konieczności, wyszedłem z domu. Wyciągnąłem ze stodoły rower i, wciąż w piżamie, wyruszyłem w kierunku CDF. Mimo olbrzymiego wysiłku posuwałem się straszliwie powoli. Wiedziałem, że mam do załatwienia bardzo ważną sprawę, a zupełnie nie mogłem przyspieszyć. Wtedy przypomniałem sobie, co mi mówił ostatnio pewien znajomy psycholog: jest taki rodzaj snu, zwany snem jasnym, w którym śniący zdaje sobie sprawę z tego, że śni. Wiedząc o tym, można, wedle słów psychologa, dowolnie pokierować swoim snem. Przede wszystkim musiałem więc znaleźć jakieś dane świadczące o tym, że to wszystko jest snem, a nie jawą. To było łatwe: po tej cholernej kursywie poznałem, że to sen. Nie znoszę jej. Strasznie trudno się ją czyta. Przejąłem kontrolę nad swym snem. „Dość tej kursywy!” - wrzasnąłem.

No, już lepiej. Przerzuciłem łańcuch na wyższy tryb i pomknąłem z prędkością światła (przecież mogłem wszystko) w kierunku CDF. Oj, za szybko, okrążyłem Ziemię osiem razy i wylądowałem z powrotem w domu. Znów przełożyłem łańcuch - tym razem niżej - i ruszyłem z umiarkowaną prędkością 180 km/h. Nawet o trzeciej nad ra-

nem parking był dość wypełniony - protony w akceleratorze nie zatrzymują się z zapadnięciem nocy.

Pogwizdując upiorną melodyjkę wkroczyłem do budynku. CDF to przemysłowa budowla w kształcie hangaru. Wszystko wewnątrz pomalowane jest na jaskrawo pomarańczowy lub niebieski kolor. Różne pracownie, gabinety, hale komputerowe i pomieszczenia kontrolne rozmieszczone są po jednej stronie budynku. Pozostała część to otwarta przestrzeń mieszcząca trzypiętrowy, ważący pięćset ton detektor. Dwustu fizyków i tyluż inżynierów spędziło osiem lat na składaniu tego szczególnego szwajcarskiego zegarka. Detektor zbudowany jest na planie wieloramiennej gwiazdy, jego części składowe promieniście rozchodzą się od niewielkiego, centralnie położonego otworu. Detektor jest koronnym klejnotem laboratorium, bez niego nie moglibyśmy „zobaczyć”, co się dzieje w tunelu akceleratora, który przechodzi przez środek jego rdzenia. A dzieje się wiele, gdyż w samym centrum detektora zachodzą czołowe zderzenia protonów i antyprotonów. Promieniście rozchodzące się „szprychy” odpowiadają z grubsza promienistemu rozsiewowi setek cząstek wyprodukowanych w wyniku zderzenia.

Detektor jest ustawiony na szynach, co pozwala na wysunięcie tego ogromnego urządzenia z tunelu akceleratora do hali, by dokonać okresowych napraw i przeglądów. Zazwyczaj planujemy remonty na miesiące letnie, gdy prąd jest najdroższy. (Kiedy rachunki za elektryczność przewyższają 10 milionów dolarów rocznie, robi się wszystko, co tylko możliwe, żeby zmniejszyć koszty). Tej nocy detektor pracował. Był wsunięty na swoje miejsce w tunelu, a przejście do pomieszczenia remontowego zasłaniała stalowa płyta o grubości ponad trzech metrów, która ma zatrzymywać promieniowanie. Akcelerator jest zaprojektowany w ten sposób, by protony i antyprotony zderzały się głównie w tym kawałku rury próżniowej, który przechodzi przez detektor i jest zwany obszarem zderzeń. Zadaniem detektora jest oczywiście wykrywanie i katalogowanie produktów czołowych zderzeń między protonami i antyprotonami.

Wciąż ubrany jedynie w piżamę wszedłem do pomieszczenia kontrolnego znajdującego się na pierwszym piętrze, gdzie nieustannie monitorowane są dane napływające z detektora. W pomieszczeniu panowała cisza, czego należało się o tej porze spodziewać. Nie było spawaczy ani żadnych innych robotników, którzy raczej za dnia dokonują drobnych napraw. Światła jak zwykle były przyćmione, co ułatwia odczytywanie danych wyświetlanych na kilkunastu charakterystycznie jarzących się ekranach. Komputery, których używamy w CDF, to zwykle Macintoshe. Być może, masz taki sprzęt w swoim domu, drogi Czytelniku, i używasz go do zapisywania domowych wydatków lub do rozmaitych gier komputerowych. Macintoshe otrzymują informacje z ogromnego komputera „własnej roboty”, pracującego w duecie z detektorem. Jego zadanie polega na śledzeniu i sortowaniu odłamków powstałych w wyniku zderzeń protonów z antyprotonami. Ten wielki komputer jest bardzo wyrafinowanym systemem gromadzenia danych (*Data Acquisition System*, w skrócie zwany DAQ) i owocem współpracy najzdolniejszych specjalistów z około piętnastu uniwersytetów z całego świata. DAQ został tak zaprogramowany, by mógł oceniać, które z setek tysięcy zderzeń zachodzących w każdej sekundzie są dostatecznie interesujące, by warto było je analizować dalej i rejestrować na taśmie magnetycznej. Macintoshe natomiast nadzorują całe mnóstwo podsystemów zbierających dane.

Rozejrzałem się po pomieszczeniu, zauważyłem liczne puste kubki po kawie i niewielką grupę młodych fizyków, którzy na skutek spędzenia w laboratorium zbyt wielu godzin i przyjęcia zbyt wielkiej dawki kofeiny byli jednocześnie podekscytowani i wy-

czepiani. O tej nieludzkiej porze można tam było znaleźć doktorantów i asystentów, którzy mają jeszcze zbyt niską pozycję, by wywalczyć sobie przyzwoite godziny pracy. Warta odnotowania była pewna liczba młodych kobiet - rzecz rzadko spotykana w tej specjalności. Agresywna polityka kadrowa przyniosła zauważalne efekty ku przyjemności i korzyści całej grupy.

W samym kącie siedział mężczyzna, który jakoś nie pasował do otoczenia. Był chudy i miał zmierzwioną brodę. Wyglądem nie odbiegał tak bardzo od innych, ale coś mi mówiło, że nie należy do personelu. Być może ta toga... Siedział, przyglądał się komputerowi i chichotał nerwowo. Pomyślcie tylko: chichotać w pomieszczeniu kontrolnym CDF! Nad jednym z najwspanialszych eksperymentów w dziejach ludzkości! Pomyślałem, że muszę z tym zrobić porządek.

LEDERMAN: Przepraszam, czy to ty jesteś tym nowym matematykiem, którego mieli przysłać z Uniwersytetu w Chicago?

DEMOKRYT: Zawód się zgadza, tylko nie to miasto. Jestem Demokryt, przybywam z Abdery, a nie z Chicago. Nazywają mnie Śmiejącym się Filozofem.

LEDERMAN: Z Abdery?

DEMOKRYT: Takie miasto w Tracji, w Grecji.

LEDERMAN: Nie przypominam sobie, bym zgłaszał zapotrzebowanie na kogokolwiek z Tracji. Nie potrzebujemy też Śmiejącego się Filozofa. W Fermilabie to ja jestem od opowiadania dowcipów.

DEMOKRYT: Tak, słyszałem o Śmiejącym się Dyrektorsze. Nie martw się, nie zabawię tu długo. W każdym razie nie po tym, co tu widziałem.

LEDERMAN: To co tu robisz?

DEMOKRYT: Szukam czegoś. Czegoś bardzo małego.

LEDERMAN: To dobrze się składa, małe to nasza specjalność.

DEMOKRYT: Tak mówią. Szukam tego już od dwóch i pół tysiąca lat.

LEDERMAN: O, to ty jesteś tym Demokrytem!

DEMOKRYT: A znasz jakiegoś innego?

LEDERMAN: Rozumiem, jesteś jak anioł Clarence z *It's a Wonderful Life*, przysłany tu, by mnie odwieść od popełnienia samobójstwa. Rzeczywiście, myślałem o podcięciu sobie żył. Nie możemy znaleźć kwarka *t*.

DEMOKRYT: Samobójstwo? Przypominasz mi Sokratesa. Nie, nie jestem aniołem. Zresztą pojęcie nieśmiertelności pojawiło się już po mnie, spopularyzował je ten półgłówek Platon.

LEDERMAN: Skoro nie jesteś nieśmiertelny, to skąd się tu wzięłeś? Umarłeś ponad dwa tysiące lat temu.

DEMOKRYT: Są rzeczy na niebie i ziemi, drogi Horacjuszu, o których nie śniło się filozofom.

LEDERMAN: Jakbym to gdzieś już słyszał.

DEMOKRYT: Pożyczyłem sobie tę myśl od gościa, którego spotkałem w XVI wieku. Ale wracając do twojego pytania: jestem tu dzięki temu, co nazywacie podróżami w czasie.

LEDERMAN: Podróże w czasie? W V wieku przed naszą erą w Grecji wiedzieliście już, jak to się robi?

DEMOKRYT: Czas to drobiazg, płynie w przód, płynie w tył. Można się po nim ślizgać jak na desce surfingowej. Materię o wiele trudniej rozgryźć. Wysłaliśmy nawet do waszej epoki paru naszych studentów. Z tego, co słyszę, jeden z nich, Stephanos

Hawking, narobił tu sporo zamieszania. Specjalizował się w „czasie”, u nas nauczył się tego wszystkiego.

LEDERMAN: Dlaczego nie opublikowaliście tego odkrycia?

DEMOKRYT: Opublikowaliśmy? Napisałem 67 książek i byłbym nawet sporo sprzedał, ale wydawcy nie chciało się ich reklamować. Większość z tego, co o mnie wiecie, pochodzi z pism Arystotelesa, ale powiem ci coś, podróżowałem wiele, bardzo wiele. Zwiedziłem więcej świata niż którykolwiek z moich współczesnych, prowadziłem rozległe badania, słuchałem wielu sławnych ludzi...

LEDERMAN: Ale Platon nie znosił twoich poglądów. Czy to prawda, że nie znosił ich do tego stopnia, iż domagał się, by spalono wszystkie twoje dzieła?

DEMOKRYT: Tak, i prawie mu się udało do tego doprowadzić - staremu, przesadnemu capowi. A potem ten pożar w Aleksandrii zupełnie pograżył moją reputację, dlatego wy, tak zwani nowożytni, jesteście takimi ignorantami w zakresie manipulacji czasem. Teraz o niczym innym się nie mówi, tylko o Newtonie i Einsteinie...

LEDERMAN: Czemu więc zawdzięczamy twą wizytę w Batawii w dziewięćdziesiątych latach XX wieku?

DEMOKRYT: Chciałem sprawdzić, jak się miewa jedna z moich idei, którą, niestety, moi rodacy odrzucili.

LEDERMAN: Założę się, że chodzi ci o atom, *atomos*.

DEMOKRYT: Tak, o a-tom, o ostateczną, niepodzielną i niewidoczną cząstkę. O podstawowy składnik materii. Skaczę sobie do przodu w czasie, by zobaczyć, jak ludzie sobie radzą z doskonaleniem tej teorii.

LEDERMAN: A twoja teoria mówiła...

DEMOKRYT: Podpuszczasz mnie, młody człowieku. Świetnie wiesz, jakie były moje przekonania. Nie zapominaj, że podróżuję sobie w czasie stulecie po stuleciu i dekada po dekadzie. Orientuję się, że XIX-wieczni chemicy i XX-wieczni fizycy odgrzali moje pomysły. Nie zrozum mnie źle: mieliście do tego pełne prawo. Gdybyż tylko Platon był tak mądry.

LEDERMAN: Ja tylko chciałem usłyszeć to z twoich ust. Znamy przecież twoje prace głównie z pism innych autorów.

DEMOKRYT: No dobrze, zacznę więc po raz n-ty. Jeśli wyglądam na znudzonego, to tylko dlatego, że właśnie przerabiałem ten materiał z Oppenheimerem. Tylko błagam, przynajmniej ty nie przerywaj mi nudnymi rozważaniami na temat podobieństw łączących fizykę i hinduizm.

LEDERMAN: Chciałbyś może poznać moją teorię na temat roli kuchni chińskiej w złamaniu symetrii zwierciadlanej? Jest równie uprawniona, jak ta, która mówi, że świat składa się z powietrza, ognia i wody.

DEMOKRYT: Zamilknij wreszcie i pozwól mi zacząć od początku. Siadaj koło tego tu Macintosha i uważaj. Żeby zrozumieć moje prace i prace innych atomistów, musimy się cofnąć w czasie o 2600 lat. Zaczniemy na 200 lat przed moim urodzeniem od Talesa, który żył około 600 r. p.n.e. w Milecie, zapadłym mieście w Jonii, którą wy teraz nazywacie Turcją.

LEDERMAN: Tales także był filozofem?

DEMOKRYT: Jeszcze jak! Był pierwszym greckim filozofem. A filozofowie w pre-sokratejskiej Grecji wiedzieli już naprawdę dużo. Tales miał osiągnięcia w matematyce i astronomii. Studiował w Egipcie i Mezopotamii. Czy wiesz, że przewidział zaćmienie Słońca, do którego doszło pod koniec wojny między Lidyjczykami a Medami? Zestawił

jeden z pierwszych kalendarzy - rozumiem, że dziś zostawiacie to zajęcie farmerom - i nauczył żeglarzy, jak sterować statkiem w nocy według gwiazdozbioru Małej Niedźwiedzicy. Był też doradcą politycznym, wytrawnym biznesmenem i znakomitym inżynierem. Pierwszych filozofów szanowano nie tylko za estetyczną wartość ich twórczości umysłowej, lecz także za biegłość w zakresie sztuk praktycznych, czyli w tym, co wy zwiecie naukami stosowanymi. Czy teraz jest inaczej z fizykami?

LEDERMAN: Od czasu do czasu udawało nam się zrobić coś pożytecznego, ale z przykrością muszę stwierdzić, że nasze osiągnięcia skupiają się raczej w wąskiej dziedzinie, a zupełnie nieliczni z nas znają grekę.

DEMOKRYT: Zatem dobrze się składa, że ja władam twoim językiem. W każdym razie Tales, podobnie jak ja, zadawał sobie pytanie: Z czego zbudowany jest świat i jak działa? Wydaje się, że zewsząd otacza nas chaos. Kwiaty kwitną i zamierają, powodzie pustoszą doliny, jeziora przeobrażają się w pustynie. Meteoryty spadają z nieba, trąby powietrzne pojawiają się nie wiadomo skąd. Od czasu do czasu wybucha góra. Ludzie starzeją się, umierają i obracają w proch i pył. Czy jest cokolwiek stałego, jakaś podstawowa zasada, która trwa mimo tej nieustającej przemiany? Czy można to wszystko zredukować do reguł dostatecznie prostych, byśmy mogli pojąć je naszym ograniczonym umysłem?

LEDERMAN: Czy Tales znalazł odpowiedź?

DEMOKRYT: Woda! Tales mówił, że woda jest pierwotnym i ostatecznym żywiołem.

LEDERMAN: Jak do tego doszedł?

DEMOKRYT: To wcale nie jest taki głupi pomysł. Nie wiem dokładnie, co Tales sobie myślał, ale zastanówmy się przez chwilę... Woda jest niezbędna do wzrostu, przynajmniej dla roślin. Nasiona ze swej natury są wilgotne. Prawie wszystko wydziela wilgoć podczas podgrzewania. No i woda jest jedyną znaną nam substancją, która może jednocześnie występować w stanie stałym, ciekłym i gazowym. Być może myślał, że można wodę przekształcić w ziemię, jeśli tylko poprowadzi się ten proces nieco dalej. Tak czy owak, uważam, że Tales dał znakomity początek temu, co zwiecie nauką.

LEDERMAN: Nie najgorzej jak na pierwszą próbę.

DEMOKRYT: Wygląda na to, że Tales i jego następcy mieli u historyków, a zwłaszcza u Arystotelesa, złą prasę. Siły i przyczyny to obsesja tego ostatniego. Trudno było z nim porozmawiać o czymkolwiek innym, więc się strasznie czepiał Talesa i jego przyjaciół z Miletu. Dlaczego woda? I jaka siła powoduje, że stała woda zmienia się w gazową? Dlaczego jest tak wiele rodzajów wody?

LEDERMAN: W nowoczesnej fizyce, yyy... to znaczy w fizyce naszych czasów uważamy, że oprócz materii niezbędne są siły, aby...

DEMOKRYT: Bardzo możliwe, ale Tales i jego przyjaciele umieścili pojęcie siły w samej istocie materii wywodzącej się z wody. Siła i materia zjednoczone! Zostawmy to na potem, wtedy będziesz mi mógł opowiedzieć o tych waszych gluonach, supersymetrii i...

LEDERMAN: [*nerwowo skrobiąc się po gęsiej skórce*] Hm... To co jeszcze zrobił ten geniusz?

DEMOKRYT: Był wyznawcą dość typowych mistycznych poglądów. Wierzył, że Ziemia unosi się na wodach i że magnes ma duszę, bo może poruszać żelazo. Ale wierzył także w prostotę: że jest w świecie jakaś jedność, chociaż ze wszystkich stron ota-

czają nas różne materialne „rzeczy”. Tales połączył racjonalne tezy z różnymi mitycznymi przeżytkami, by woda mogła spełniać tę szczególną rolę, którą jej wyznaczył.

LEDERMAN: Zdaje mi się, że Tales wierzył, iż świat podtrzymywany jest przez Atlasa stojącego na żółwiu.

DEMOKRYT: *Au contraire*. Tales odbył kiedyś bardzo ważne spotkanie ze swymi przyjaciółmi, chyba na zapleczu pewnej restauracji w Milecie. Po spożyciu odpowiedniej ilości egipskiego wina zrezygnowali z Atlasa i powzięli uroczyste postanowienie: „Począwszy od dzisiejszego dnia wyjaśnienia i teorie opisujące świat oparte będą na ścisłych zasadach logicznego rozumowania. Koniec z przesądami. Koniec z odwoływaniem się do Zeusa, Ateny, Herkulesa, Ra, Buddy, Lao-tsy. Zobaczymy, czy możemy się sami czegoś dowiedzieć”. Możliwe, że było to najważniejsze postanowienie, jakie kiedykolwiek podjęto w dziejach ludzkości. W roku 650 p.n.e., prawdopodobnie w czwartek wieczór, narodziła się nauka.

LEDERMAN: Sądzisz, że pozbyliśmy się już przesądów? Powinieneś zobaczyć naszych kreacjonistów albo ekstremistycznych obrońców praw zwierząt.

DEMOKRYT: Tu, w Fermilabie?

LEDERMAN: Nie, ale całkiem niedaleko. Powiedz mi, skąd się wziął ten pomysł z powietrzem, ogniem i wodą?

DEMOKRYT: Powoli, powoli, zanim dojdziemy do tej teorii, musimy najpierw omówić parę innych. Na przykład teorię Anaksymandra. Był uczniem Talesa. On także zdobył sławę, zajmując się różnymi praktycznymi sprawami, takimi jak wykreślanie mapy Morza Czarnego dla milezyjskich żeglarzy. Podobnie jak Tales, zastanawiał się nad budową materii, ale według niego woda nie mogła być jej podstawową cegiełką.

LEDERMAN: Niewątpliwie kolejny wielki krok naprzód poczyniony przez myśl grecką. Co zaproponował Anaksymander - baklawę¹?

DEMOKRYT: Śmieję się, śmieję. Zaraz dojdziemy do twoich teorii. Anaksymander był geniuszem praktyki, tak jak Tales, i podobnie jak on w wolnych chwilach wdawał się w dysputy filozoficzne. Jego logika była dość subtelna, postrzegał świat jako złożony z pozostających w konflikcie przeciwieństw - zimne i gorące, suche i mokre. Woda gasi ogień, Słońce wysusza wodę etc. Dlatego ani woda, ani ogień, ani cokolwiek innego dającego się scharakteryzować za pomocą jednego z tych przeciwieństw nie może stanowić pierwotnej substancji kosmicznej. Zabrakłoby symetrii, a wszystkim wiadomo, jak my, Grecy, kochamy symetrię. Jeśli na przykład cała materia byłaby wodą, nigdy nie mogłoby powstać ciepło ognia, ponieważ woda nie tworzy ognia, tylko go niszczy, twierdził Anaksymander.

LEDERMAN: Co więc zaproponował jako pierwotną substancję?

DEMOKRYT: Coś, co nazwał *apeironem*, czyli bezkresem. Pierwotnym stanem materii była niezróżnicowana masa o kolosalnych, może nawet nieskończonych rozmiarach; prymitywne tworzywo, neutralne wobec przeciwieństw. Ta koncepcja wywarła wielki wpływ na mój własny sposób myślenia.

LEDERMAN: Ów *apeiron* był więc czymś w rodzaju twojego a-tomu, tylko że zamiast niewyobrażalnie małej cząstki Anaksymander przywołał nieskończoną substancję. Trochę trudno się w tym połąpać.

¹ Grecki deser zrobiony z cienkich warstewek ciasta przekładanych miodem, zmielonymi orzechami itp. (przyp. red.).

DEMOKRYT: Nie, Anaksymander znalazł się na dobrym tropie. *Apeiron* był nieskończony w czasie i przestrzeni. Nie miał także żadnej struktury, jakichkolwiek części składowych. Nic, tylko *apeiron*, bez końca. Jeśli już trzeba zdecydować się na jakąś pierwotną substancję, to musi ona mieć tę właśnie cechę. W gruncie rzeczy zmierzam do tego, by cię zawstydzić: zwracam uwagę, że po dwóch tysiącach lat zaczynacie wreszcie doceniać wartość naszych pomysłów. Przecież Anaksymander po prostu wynalazł próżnię. Zdaje się, że wasz P. A. M. Dirac zaczął obdarzać próżnię należnymi jej przymiotami w latach dwudziestych XX wieku. *Apeiron* Anaksymandra był prototypem mojej własnej próżni - nicości, w której poruszają się cząstki. Isaac Newton i James Clerk Maxwell nazywali ją eterem.

LEDERMAN: Ale co z substancją, z materią?

DEMOKRYT: Posłuchaj, co mówi Anaksymander [*spomiędzy fałd togi wyciąga pergamin, a na nosie umieszcza parę plastikowych szkieł do czytania*]: „Nie jest to woda ani żaden inny z tak zwanych żywiołów, ale zupełnie inna substancja. Jest ona bezgraniczna, z niej powstają ciągle wszystkie niebiosa i wypełniające je światy. Rzeczy przemijają i obracają się w to, z czego czerpią swe istnienie, [...] przeciwieństwa są w niej zanurzone i z niej się wyodrębniają”. No właśnie, wiem, że wy wszyscy w XX wieku mówicie ciągle o materii i antimaterii, powstających w próżni, i o anihilacji...

LEDERMAN: Oczywiście, tylko że...

DEMOKRYT: Kiedy Anaksymander mówi, że przeciwieństwa zanurzone są w *apeironie* - nazwijmy go próżnią czy eterem - i wyodrębniają się z niego, to czy nie przypomina ci to tego, w co sami wierzycie?

LEDERMAN: Może i tak, ale najbardziej ciekawi mnie, jak on doszedł do takich wniosków.

DEMOKRYT: Oczywiście, nie przewidywał istnienia antimaterii, ale myślał, że w próżni obdarzonej odpowiednimi własnościami przeciwieństwa mogły rozdzielać się na gorące i zimne, mokre i suche, słodkie i kwaśne. Dziś dodajecie jeszcze: dodatnie i ujemne, północ i południe. Gdy przeciwieństwa są wymieszane, ich własności znoszą się nawzajem i powstaje w ten sposób neutralny *apeiron*. Czyż nie jest to eleganckie rozwiązanie?

LEDERMAN: A co zrobić z demokratą i republikaninem? A może był jakiś Grek o imieniu Republikanes?

DEMOKRYT: Bardzo zabawne. Anaksymander próbował wyjaśnić mechanizm odpowiedzialny za stworzenie różnorodności z pierwotnego żywiołu. Z tej teorii wynikał pewien zespół przekonań, niektóre z nich mógłbyś nawet uznać za słuszne. Anaksymander uważał na przykład, że człowiek powstał drogą ewolucji z niższych zwierząt, które z kolei pochodzą od stworzeń morskich. Jego największym osiągnięciem kosmologicznym było nie tylko to, że zrezygnował z Atlasa, lecz także to, iż pozbył się Talesowego oceanu podtrzymującego Ziemię. Wyobraź sobie obiekt (jeszcze nie nadano Ziemi kulistego kształtu) zawieszony w nieskończonej przestrzeni. Nie ma gdzie spaść. Wniosek ten jest w pełni zgodny z prawami Newtona, jeśli - jak wierzyli Grecy - nie ma w przestrzeni niczego innego oprócz Ziemi. Anaksymander uważał także, że musiało istnieć więcej wszechświatów. Twierdził, że światów, które powstają i giną, jest nieskończenie wiele.

LEDERMAN: Zupełnie jak alternatywne światy w *Star Trek*!

DEMOKRYT: Powstrzymaj się, proszę, z tymi reklamami. Idea niezliczonych światów była dla nas, atomistów, bardzo istotna.

LEDERMAN: Chwileczkę, przypominam sobie coś, co napisałeś, a co w świetle współczesnych odkryć kosmologii przypawiło mnie o dreszcze. Nawet nauczyłem się tego na pamięć. Zaraz, zaraz, jak to szło? Twierdziłeś, że „światów jest nieskończenie wiele i że różnią się wielkością. W niektórych światach nie ma ani słońca, ani księżyca, w innych znów są o wiele mniejsze albo znacznie większe niż w świecie naszym”.¹

DEMOKRYT: Tak, my, Grecy, dzieliliśmy niektóre poglądy z waszym kapitanem Kirkiem. Tylko ubieraliśmy się o niebo lepiej. Ja raczej porównałbym tę moją ideę do bąblowych wszechświatów, o których wasi kosmolodzy publikują ostatnio sporo artykułów.

LEDERMAN: To właśnie zrobiło na mnie tak wielkie wrażenie. Czyż jeden z twoich poprzedników nie uważał, że podstawowym żywiołem było powietrze?

DEMOKRYT: Myślisz o Anaksymenesie, młodszym koledze Anaksymandra, ostatnim uczniu Talesa. Jego koncepcja była krokiem do tyłu. Podobnie jak Tales, uważał on, że istniał pierwotny żywioł wspólny całej materii, tylko że według niego było nim powietrze, a nie woda.

LEDERMAN: Powinien był lepiej słuchać swego mistrza, wykluczyłby z pewnością coś tak banalnego, jak powietrze.

DEMOKRYT: Tak, lecz Anaksymenes wymyślił sprytny mechanizm wyjaśniający, jak z tego pierwotnego żywiołu powstają rozmaite formy materii. Jak wnoszę z moich lektur, ty jesteś eksperymentatorem.

LEDERMAN: Tak. A co, może ci to przeszkadza?

DEMOKRYT: Wyczuwam w twoich słowach wiele sarkazmu skierowanego przeciw naszym teoriom. Przypuszczam, że twoje uprzedzenia biorą się stąd, iż wiele z tych teorii, choć mają one swe źródło w obserwacjach otaczającego nas świata, nie podlega jednoznacznej weryfikacji eksperymentalnej.

LEDERMAN: To prawda, my, doświadczalnicy, uwielbiamy teorie, które się dają zweryfikować. Z tego przecież żyjemy.

DEMOKRYT: Może więc będziesz miał nieco więcej poważania dla Anaksymenesa, bo jego poglądy wywodzą się z obserwacji. Głosił, że różne postacie materii wydzielane są z powietrza w wyniku procesów kondensacji i rozrzedzania. Powietrze można przemienić w wilgoć i na odwrót; ciepło i zimno przekształcają powietrze w inne substancje. By zademonstrować związek ciepła z procesem rozrzedzania i zimna z procesem kondensacji, Anaksymenes proponował swym słuchaczom przeprowadzenie prostego doświadczenia. Należy zrobić wydech przez niemal zamknięte usta - wychodzące powietrze będzie chłodne. Natomiast jeśli usta otworzyć szeroko, oddech będzie ciepły.

LEDERMAN: Anaksymenes bardzo by się spodobał Kongresowi, jego doświadczenia są znacznie tańsze od moich. I do tego to ciepłe powietrze...

DEMOKRYT: Rozumiem, ale chciałem tylko zachwiać twoim przekonaniem, że my, Grecy, nigdy nie eksperymentowaliśmy. Podstawową wadą koncepcji takich myślicieli, jak Tales i Anaksymenes, było to, że dopuszczali możliwość przekształcania jednych substancji w inne: woda zmienia się w ziemię, powietrze w ogień. Nie da rady! Dopiero moi współcześni - Empedokles i Parmenides - zwrócili uwagę na ten drobny szczegół.

LEDERMAN: Empedokles to ten facet od ziemi, powietrza itd.? A Parmenides?

¹ Kazimierz Leśniak: *Materialiści greccy w epoce przedsokratejskiej*, Warszawa 1972, s. 233.

DEMOKRYT: Zwał go czasem ojcem idealizmu, bo znaczną część jego myśli przejął ten idiota Platon, ale tak naprawdę był zatwardziałym materialistą. Mówił sporo o Bycie, ale jego Byt był materialny. Krótko mówiąc, Parmenides uważał, że Byt ani nie powstaje, ani nie przemija. Materia nie pojawia się i nie znika. Ona po prostu jest i nie potrafimy jej unicestwić.

LEDERMAN: Chodź ze mną na dół do akceleratora i sam się przekonaj, w jak wielkim był błędzie. My sprawiamy, że materia pojawia się i znika bez przerwy.

DEMOKRYT: Dobrze, dobrze, ale to bardzo istotne pojęcie. Parmenides wyraził drogą nam Grekom ideę pełni. Co istnieje, to istnieje, jest kompletne i trwałe. Podejrzewam, że ty i twoi koledzy także wyznajecie tę zasadę.

LEDERMAN: To prawda, pojęcie to jest nam drogie. Dążymy do osiągnięcia jedności w naszych przekonaniach wszędzie tam, gdzie to tylko możliwe. Wielka Unifikacja jest jedną z naszych obsesji.

DEMOKRYT: I w gruncie rzeczy nie samą tylko siłą woli doprowadzacie do pojawiania się i znikania materii. O ile wiem, musicie dorzucić trochę energii.

LEDERMAN: Rzeczywiście, na dowód mogę nawet pokazać rachunki za elektryczność.

DEMOKRYT: Tak więc na swój sposób Parmenides był blisko. Jeśli w tym, co zwał Bytem, zawrzemy zarówno materię, jak i energię, to miał rację. Nie może powstawać ani znikać, przynajmniej jeśli ujmijemy rzecz globalnie. A jednak świadectwo naszych zmysłów jest zupełnie inne. Widzimy drzewa spalane na popiół. Ogień można ugasić wodą. Latem gorące powietrze może sprawić, że woda wyparuje. Pojawiają się i giną kwiaty. I właśnie Empedokles zdołał zaproponować rozwiązanie tego paradoksu. Zgadzał się z Parmenidesem, że ilość materii musi być zachowana, że materia nie może się ni stąd, ni zowąd pojawiać albo znikać. Ale w przeciwieństwie do Talesa i Anaksymenesa uważał, że jeden rodzaj materii nie może się przekształcić w inny. Jak zatem wyjaśnić nieustannie zachodzące w naszym otoczeniu zmiany? Są tylko cztery rodzaje materii, mówił Empedokles, mając na myśli to jego słynne: „ziemia, powietrze, ogień i woda”. Żaden z nich nie może zmieniać się w inny, ale są niezmiennymi i ostatecznymi cząstkami, z których zbudowane jest wszystko.

LEDERMAN: No, wreszcie dochodzimy do sedna sprawy.

DEMOKRYT: Tak sądziłem, że cię to ucieszy. Ciała powstają w wyniku mieszania tych żywiołów, a ulegają zagładzie na skutek separacji. Jednak same żywioły - ziemia, powietrze, ogień i woda - ani nie powstają, ani nie giną; pozostają niezmiennie. Oczywiście, nie zgadzam się z nim w sprawie tożsamości tych składowych cząstek, ale trzeba przyznać, że dokonał on istotnego przełomu intelektualnego. Jest tylko kilka podstawowych elementów, z których składa się cały świat. Rzeczy powstają z tych składników na skutek mieszania się ich na liczne możliwe sposoby. Empedokles twierdzi na przykład, że kości składają się z dwóch części ziemi, dwóch części wody i czterech części ognia. Nie pomnę w tej chwili, jak doszedł do tego przepisu.

LEDERMAN: Wypróbowaliśmy ten przepis na wodno-ziemno-ognistą miksturę, ale w efekcie otrzymaliśmy tylko gorące, bulgoczące błoto.

DEMOKRYT: No i gadaj tu ze „współczesnym”. Nikt tak nie spłyci dyskusji.

LEDERMAN: Ale co z siłami? Wygląda na to, że żaden z was nie zdawał sobie sprawy z tego, iż oprócz materii konieczne są też siły.

DEMOKRYT: Ja mam pewne wątpliwości, ale Empedokles całkowicie by się z tobą zgodził. On też uważał, że siły są konieczne, by łączyć żywioły w różnych ciałach.

Zaproponował dwie siły: miłość i niezgodę. Miłość, by zbliżała, niezgodę, by oddalała. Może to nie jest zupełnie naukowe, ale czyż uczeni w twojej epoce nie myślą w podobny sposób o Wszechświecie? Pewna liczba cząstek i zestaw sił. Na dodatek wiele z nich ponazywaliście tak jakoś dziwnie.

LEDERMAN: W zasadzie, tak. Zbudowaliśmy tak zwany Model Standardowy. Zgodnie z nim wszystko, co wiemy o Wszechświecie, można wyjaśnić w kategoriach oddziaływań między tuzinem cząstek i czterema siłami.

DEMOKRYT: No proszę, poglądy Parmenidesa nie różnią się od waszych tak bardzo, co? On twierdził, że można opisać świat za pomocą czterech cząstek i dwóch sił. Wy tylko dorzuciliście parę dodatkowych, ale struktura obu modeli jest podobna, czyż nie?

LEDERMAN: Oczywiście, ale zupełnie nie zgadzamy się z treścią jego modelu: ogień, ziemia, niezgoda...

DEMOKRYT: No, spodziewam się, że macie się czym wykazać po dwóch tysiącach lat ciężkiej pracy, ale rzeczywiście, ja też nie zgadzam się z treścią jego teorii.

LEDERMAN: Jak w takim razie wygląda twoja koncepcja?

DEMOKRYT: Dochodzimy teraz do sedna sprawy. Prace Parmenidesa i Empedoklesa przygotowały dla mnie pole. Ja wierzę w a-tom, czy atom, niepodzielną cząstkę. A-tom jest podstawową cegiełką materii. Cała materia zbudowana jest z atomów łączących się ze sobą w najróżniejszych kombinacjach. Są one najmniejszymi obiektami istniejącymi w naszym Wszechświecie.

LEDERMAN: W V wieku p.n.e. dysponowaliście w Grecji przyrządami umożliwiającymi znalezienie niewidocznych obiektów?

DEMOKRYT: Niezupełnie „znalezienie”.

LEDERMAN: A zatem co?

DEMOKRYT: Może „odkrycie” będzie tu lepszym terminem. Odkryłem atomy posługując się Czystym Rozumem.

LEDERMAN: Chcesz przez to powiedzieć, że po prostu o nich myślałeś i nie zwracałeś sobie głowy żadnymi eksperymentami?

DEMOKRYT [*wskazuje ręką w stronę odległych rejonów laboratorium*]: Są pewne eksperymenty, które można znacznie lepiej przeprowadzić posługując się umysłem, niż największymi i najbardziej precyzyjnymi urządzeniami.

LEDERMAN: Co ci nasunęło ten pomysł? Muszę przyznać, że była to genialna hipoteza, a przy tym tak bardzo wykraczała poza wszystko, o czym mówiono wcześniej.

DEMOKRYT: Chleb.

LEDERMAN: Chleb? Ktoś ci zapłacił, żebyś wymyślił atomy?

DEMOKRYT: Nie, nie w tym sensie mówię o chlebie. Pamiętaj, że było to na długo przed wynalezieniem dotacji rządowych. Mam na myśli prawdziwy chleb. Pewnego dnia, podczas przedłużającego się postu, przyszedł do mej pracowni ktoś ze świeżym chlebem, prosto z pieca. Wiedziałem, że to chleb, jeszcze zanim go zobaczyłem. Pomyślałem sobie: „Jakaś niewidoczna istota chleba wyprzedziła go i dotarła do mego greckiego nosa”. Zacząłem zwracać uwagę na zapachy i zastanawiałem się nad innymi podróżującymi „istotami rzeczy”. Mała kałuża kurczy się i w końcu wysycha. Dlaczego? Jak? Czy niewidoczna istota wody może wyskoczyć z kałuży i podróżować tak, jak istota ciepłego chleba? Mnóstwo podobnych rzeczy widzi się dookoła każdego dnia, rozmyśla się o nich i rozmawia. Mój przyjaciel Leukippos i ja spieraliśmy się całymi dniami i nocami, aż nieraz nasze żony przychodziły po nas ze ścierką w ręce. W końcu zgodzi-

liśmy się, że jeśli substancje miałyby być zbudowane z atomów - cząstek tak małych, że aż niewidocznych - musiałyby ich być stanowczo zbyt wiele rodzajów: atom wody, atom żelaza, atom płatka stokrotki, atom przedniej nogi pszczoły. Byłby to bardzo nieelegancki system. A potem przyszedł nam do głowy lepszy pomysł. Weźmy tylko kilka rodzajów atomów - na przykład gładkie, chropowate, kuliste, kanciaste. Niech będzie kilka rodzajów takich kształtów i każdy z nich niech będzie dostępny w nieograniczonych ilościach. Teraz wystarczy umieścić je w pustej przestrzeni. (Trzeba ci było widzieć, ileśmy wypili piwa, zanim zrozumieliśmy pustą przestrzeń. Jak można zdefiniować „zupełne nic”?) I niech te atomy poruszają się nieustannie we wszystkich kierunkach, od czasu do czasu zderzają się ze sobą, zlepiają i grupują. Wtedy jeden zbiór atomów składa się na wino, a inny na szkło, w którym się je podaje. Podobnie z serem feta, baklawą i oliwkami.

LEDERMAN: Czy Arystoteles nie twierdził, że takie atomy musiałyby pospadać na siebie nawzajem?

DEMOKRYT: To jest już jego sprawa. Widziałeś kiedy drobinki kurzu tańczące w smudze światła? Kurz porusza się we wszystkich kierunkach, tak samo jak atomy.

LEDERMAN: A jak sobie wyobrażałeś niepodzielność atomów?

DEMOKRYT: Wyobraź sobie nóż z polerowanego brązu. Sługa ostrzył go przez cały dzień; jest już tak ostry, że można nim przeciąć źdźbło trawy trzymane za koniuszek. Teraz zabieram się do dzieła, biorę kawałek sera...

LEDERMAN: Feta?

DEMOKRYT: Oczywiście. Przecinam go na połowę, potem tę połowę znowu na pół i znowu, i znowu, dopóty, dopóki nie otrzymam grudki sera tak małej, że nie mogę jej nawet wziąć do ręki. Teraz wyobrażam sobie, że sam jestem znacznie mniejszy. Grudka sera wydaje się całkiem duża i mogę ją swobodnie trzymać i od nowa zacząć kroić moim nożem, znowu starannie naostrzonym. Teraz muszę w myśli pomniejszyć się do rozmiarów pryszczka na mrówczym nosie. Od nowa biorę się do krojenia. Wiesz, do czego dojdę, jeśli będę ten proces powtarzał dostatecznie długo?

LEDERMAN: Feta pożegnalna się nie odbędzie.

DEMOKRYT [z *jękiem*]: Nawet Śmiejący się Filozof nie przełknie kiepskich kalamburów. Jeśli mogę kontynuować... W końcu dojdę do kawałka tak twardego, że nigdy nie uda mi się go przeciąć, nawet gdybym przez sto lat ostrzył nóż. Uważam za warunek konieczny, aby najmniejszy obiekt był niepodzielny. Nie do pomyślenia jest, byśmy mogli kontynuować krojenie w nieskończoność, jak chcą niektórzy tak zwani uczeni filozofowie. W ten oto sposób doszedłem do ostatecznego, niepodzielnego obiektu, do atomu.

LEDERMAN: I doszedłeś do tego w V wieku p.n.e.?

DEMOKRYT: Tak. A co, czy wasze dzisiejsze poglądy są zupełnie inne?

LEDERMAN: Hm, w gruncie rzeczy są całkiem podobne. Tylko nie możemy się pogodzić z tym, że opublikowaliście to przed nami.

DEMOKRYT: Tylko że to, co wy, uczeni, nazywacie atomem, nie jest wcale tym, o co mi chodziło.

LEDERMAN: O, to już wina XIX-wiecznych chemików. Teraz już nikt nie twierdzi, że atomy z okresowego układu pierwiastków - wodór, tlen, węgiel i inne - są niepodzielnymi obiektami. Ci faceci trochę się pospieszyli. Myśleli, że znaleźli twoje atomy, ale jeszcze sporo „ciąć” dzieliło ich od ostatecznego sera.

DEMOKRYT: A wy go już znaleźliście?

LEDERMAN: Znaleźliśmy JE. Bo jest ich więcej niż jeden.

DEMOKRYT: No, tak. Tak właśnie to sobie z Leukipposem wyobrażaliśmy.

LEDERMAN: Myślałem, że Leukippos nie istniał naprawdę.

DEMOKRYT: Powiedz to jego żonie! Wiem, że niektórzy traktują go jak fikcyjną postać, ale był równie prawdziwy, jak ten Macintosh [*stuka dłońią w obudowę komputera*], czymkolwiek by to nie było. Leukippos, podobnie jak Tales i inni, pochodził z Miletu. Wspólnie pracowaliśmy nad teorią atomów, tak że teraz trudno powiedzieć dokładnie, który z nas co wymyślił. Tylko dlatego, że był ode mnie parę lat starszy, ludzie uważają go za mojego nauczyciela.

LEDERMAN: Ale to ty się upierałeś, że musiało istnieć wiele rodzajów atomów?

DEMOKRYT: Tak, to dobrze pamiętam. Jest nieskończenie wiele niepodzielnych cząstek. Różnią się tylko rozmiarami i kształtem, ale poza tym nie przysługują im żadne własności. Tylko twardość i nieprzenikliwość.

LEDERMAN: Mają kształt, lecz żadnej struktury?

DEMOKRYT: Można to tak wyrazić.

LEDERMAN: To jak ujmowaliście w waszym modelu standardowym związek między własnościami atomów a rzeczami, na które one się składają?

DEMOKRYT: Nie rozpracowaliśmy tego zbyt szczegółowo. Myśleliśmy, że słodkie rzeczy składają się z gładkich atomów, a gorzkie z kanciastych. Wiemy to, bo te ostatnie ranią język. Ciecze zbudowane są z atomów okrągłych, a atomy metali mają małe zameczki, dzięki którym mogą się do siebie przypinać. Dlatego są takie twarde. Ogień składa się z kulistych atomów, podobnie jak ludzka dusza. Zgodnie z teoriami Parmenidesa i Empedoklesa nic, co istnieje, nie może powstać ani ulec zniszczeniu. Rzeczy, które widzimy wokół siebie, ulegają ciągłym zmianom, ale tylko dlatego, że składają się z atomów mogących się łączyć i rozdzielać.

LEDERMAN: Jak przebiega ten proces?

DEMOKRYT: Atomy nieustannie się poruszają i łączą ze sobą, gdy pozwalają na to ich kształty. Wtedy właśnie powstają obiekty, które możemy dostrzec: drzewa, woda, *dolmades*¹. Ten nieustanny ruch może też prowadzić do rozłączania atomów i powierzchniowych zmian, które dostrzegamy w otaczającej nas materii.

LEDERMAN: Ale nowa materia, mówię o atomach, nie tworzy się ani nie niszczy?

DEMOKRYT: Nie, to jest tylko złudzenie.

LEDERMAN: Jeśli wszystkie substancje powstają z tych zasadniczo pozbawionych własności atomów, to skąd się bierze w świecie tak wielka różnorodność? Dlaczego skały są twarde, a owce miękkie?

DEMOKRYT: To proste. Twarde rzeczy mają w sobie mniej pustej przestrzeni, ich atomy są gęściej upakowane. Miękkie rzeczy zawierają więcej pustej przestrzeni.

LEDERMAN: A więc zaakceptowaliście pojęcie przestrzeni, pustki.

DEMOKRYT: Oczywiście. Mój partner Leukippos i ja wynaleźliśmy atom. Potrzebne nam było jeszcze jakieś miejsce, gdzie moglibyśmy go umieścić. Leukippos nieźle się zaplątał (i trochę nawet upił), próbując zdefiniować pustą przestrzeń dla naszych atomów. Jeśli jest pusta, jest niczym, a jak można określić nicność? Parmenides dostarczył przecież żelaznego argumentu, dowodzącego, że pusta przestrzeń nie może istnieć. W

¹ Faszerowane liście winogron (przyp. tłum.).

końcu zdecydowaliśmy, że to raczej jego dowód nie istniał i mieliśmy problem z głową [zachichotał]. Sporo retsiny¹ nam na to poszło. Gdy wprowadzono koncepcję wody-powietrza-ognia-ziemi, próżnię uznawano za piąty żywioł, czyli esencję. Stąd też termin kwintesencja² Niełatwo było to wszystko pojąć. Wy, nowocześni, akceptujecie próżnię bez zmruczenia oka.

LEDERMAN: Musimy, nie ma innego wyjścia. Nic nie działa bez, ee..., niczego. Ale nawet dziś jest to trudne i złożone pojęcie. Jednak, jak słusznie zwróciłeś uwagę, nasza nicłość - próżnia - nieustannie się zapełnia różnymi teoretycznymi tworam, takimi jak eter, promieniowanie, morze ujemnej energii, Higgs. Zupełnie jak jakiś schowek na strychu. Nie wiem, co byśmy bez niej zrobili.

DEMOKRYT: Możesz sobie wyobrazić, jak trudno było w 420 roku przed Chrystusem wyjaśnić pojęcie pustki. Parmenides zaprzeczył możliwości jej istnienia. Leukippos jako pierwszy twierdził, że pustka jest konieczna, by ruch był możliwy, i dlatego musi istnieć. Ale Empedokles miał na to sprytną odpowiedź, która na pewien czas omamiła ludzi. Powiedział, że ruch nie wymaga pustej przestrzeni. Popatrzcie na rybę pływającą w morzu, mówił, woda rozdziela się przy jej głowie i natychmiast przesuwają się do miejsca zwolnionego przez ogon. Obie - woda i ryba - pozostają w ciągłym kontakcie. Nie ma mowy o żadnej pustce.

LEDERMAN: I ludzie to kupili?

DEMOKRYT: Empedokles był bystrym facetem, już wcześniej w zasadzie rozprawił się z argumentami na rzecz próżni. Na przykład współcześni mu Pitagorejczycy akceptowali próżnię z tej prostej przyczyny, że jednostki muszą być jakoś od siebie oddzielone.

LEDERMAN: Pitagorejczycy? Czy to nie ci, co nie jadali fasoli?

DEMOKRYT: Tak, zresztą to całkiem niezły pomysł, godny polecenia w każdej epoce. Pitagorejczycy wyznawali też parę innych interesujących zasad, na przykład, że nie można siadać na wiadrze lub nie wolno stawać na obrzynkach własnych paznokci. Ale jak dobrze wiesz, mieli też pewne istotne osiągnięcia w dziedzinie matematyki i geometrii. Jednak jeśli chodzi o próżnię, Empedokles ich przechytrył, bo twierdzili, że jest wypełniona powietrzem, a on wykazał, iż powietrze składa się z cząsteczek.

LEDERMAN: Jak w takim razie doszło do tego, że zaakceptowaliście próżnię? Przecież respektowaliście poglądy Empedoklesa.

DEMOKRYT: No właśnie, długo nie mogłem się uporać z tym problemem. Jak mam opisać pustkę? Jeśli rzeczywiście jest niczym, to jak może istnieć? Moje dłonie opierają się na twoim biurku i kiedy nimi poruszam, czuję między palcami delikatny powiew powietrza wypełniającego pustkę, która oddziela mnie od tego biurka. Ale przecież powietrze nie może być próżnią, jak to zgrabnie wykazał Empedokles. Jakże mam sobie wyobrazić atomy, skoro nie czuję pustki, w której muszą się poruszać. A jednak, jeśli chcę opisać świat odwołując się do atomów, to w pierw muszę zdefiniować coś, co nie poddaje się definicji, bo jest całkowicie pozbawione własności.

LEDERMAN: To co zrobiłeś?

DEMOKRYT [śmiejąc się]: Postanowiłem się nie martwić. Wy-próżniłem to zagadnienie.

LEDERMAN: Aj waj!

¹ Greckie wino zaprawione żywicą (przyp. red.).

² łac. *quinta essentia* = piąty żywioł (przyp. tłum.).

DEMOKRYT: Poważnie mówiąc, rozwiązałem to zagadnienie za pomocą noża.

LEDERMAN: Tego wyimaginowanego, którym ciąłeś ser na atomy?

DEMOKRYT: Nie, prawdziwego noża tnącego, powiedzmy, zwykłe jabłko. Ostrze musi natrafić na puste miejsca, by mogło się w tym jabłku zagłębić.

LEDERMAN: A jeśli jabłko jest zbudowane z ciasno upakowanych atomów i nie ma między nimi żadnej pustej przestrzeni?

DEMOKRYT: Wtedy byłoby nieprzenikalne, bo i same atomy są nieprzenikalne. Cała materia, jaką widzimy i czujemy dookoła siebie, da się pociąć, jeśli tylko dysponujemy dostatecznie ostrym ostrzem. I to, według mnie, jest dowodem na istnienie próżni. Ale przede wszystkim - powiedziałem to sobie wtedy i nadal tak uważam - nie można pozwolić, by logiczne trudności nas obezwładniły. Musimy podążać dalej, ciągnąc rozumowanie, jakby nigdy nic, jak gdyby można było zaakceptować nicość. To jest ważne ćwiczenie, jeśli mamy się dalej posuwać na drodze ku rozwiązaniu zagadki Wszechświata. Musimy podjąć ryzyko upadku, stąpając na granicy logiki. Zdaje się, że wy, współcześni eksperymentatorzy, bylibyście zgorszeni taką postawą. Musicie dobrze uzasadnić każdy krok, aby posunąć się naprzód.

LEDERMAN: Nie, twoje podejście jest bardzo nowoczesne. My robimy to samo. Przyjmujemy rozmaite założenia, gdyż bez nich nie zaszlibyśmy daleko. Czasem nawet zwracamy uwagę na to, co mają do powiedzenia teoretycy. Poza tym zdarzało się nam ominąć jakąś zagadkę i zostawić ją dla przyszłych pokoleń.

DEMOKRYT: Zaczynasz mówić całkiem rozsądnie.

LEDERMAN: Tak więc twój Wszechświat jest w istocie całkiem prosty.

DEMOKRYT: Nie istnieje nic oprócz atomów i pustej przestrzeni. Wszystko inne jest opinią.

LEDERMAN: Skoro wiesz już to wszystko, to co tu robisz, u schyłku XX wieku?

DEMOKRYT: Jak już mówiłem, skakałem sobie w czasie, żeby zobaczyć, czy opinie ludzi zbiegną się z rzeczywistością i kiedy. Wiem, że moi rodacy odrzucili a-tom, ostateczną cząstkę. Rozumiem, że w roku 1993 ludzie nie tylko wierzą, że istnieje, lecz również, że ją znaleźli.

LEDERMAN: I tak, i nie. Wierzmy, że istnieje ostateczna cząstka, ale nie całkiem taka, o jakiej mówiłeś.

DEMOKRYT: Jak to?

LEDERMAN: Przede wszystkim, choć uważasz, że a-tom jest podstawową cegiełką materii, to według ciebie istnieje wiele rodzajów a-tomów: ciecze mają kuliste a-tomy, a metale - jakieś zameczki. Gładkie a-tomy składają się na cukier i inne słodczyce, a kanciaste - na cytryny i rzeczy kwaśne. I tak dalej.

DEMOKRYT: Do czego zmierzasz?

LEDERMAN: Twój system jest zbyt skomplikowany. Nasz a-tom jest znacznie prostszy. Twój model wymaga zbyt wielu rodzajów a-tomów. Równie dobrze mógłby istnieć osobny rodzaj a-tomów dla każdej substancji. My mamy nadzieję znaleźć jeden, jedyny a-tom.

DEMOKRYT: Podziwiam tak ambitne plany, ale jak taki model ma działać? Jak z jednego a-tomu można otrzymać różnorodność i czym ten a-tom jest?

LEDERMAN: Na obecnym etapie mamy niewielką liczbę a-tomów. Jeden ich typ nazywamy kwarkami, inny leptonami. Odróżniamy po sześć form w każdym z tych typów.

DEMOKRYT: W czym one przypominają mój a-tom?

LEDERMAN: Są niepodzielne, twarde, pozbawione struktury, niewidoczne i... małe.

DEMOKRYT: Jak małe?

LEDERMAN: Sądzimy, że kwark jest punktem. Nie ma rozmiarów i w odróżnieniu od twojego a-tomu - kształtu.

DEMOKRYT: Nie ma rozmiarów? Ale istnieje i ma masę? I jest twardy?

LEDERMAN: Uważamy, że jest punktem matematycznym. Natomiast sprawa twardości jest kwestią sporną. Dostępna doświadczeniu twardość materii zależy od tego, w jaki sposób kwarki łączą się ze sobą i z leptonami.

DEMOKRYT: Trudno to sobie wyobrazić, ale daj mi trochę czasu. Rozumiem zawarty tu problem teoretyczny. Myślę, że mogę zaakceptować kwarki, substancję pozbawioną rozmiarów. Ale powiedz mi, jak możesz wyjaśnić różnorodność świata: drzewa i gęsi, i komputery - za pomocą tak niewielu cząstek.

LEDERMAN: Kwarki i leptony składają się na wszystko, co tylko zawiera się we Wszechświecie. Można zrobić miliardy różnych rzeczy, mając do dyspozycji tylko dwa kwarki i lepton. Przez pewien czas myśleliśmy, że to już wszystko, ale okazało się, że przyroda domaga się jeszcze czegoś.

DEMOKRYT: Przyznaję, że tuzin cząstek to znacznie mniej niż moje rozliczne atomy, ale to wciąż jeszcze spora liczba.

LEDERMAN: Możliwe, że sześć kwarków to tylko różne przejawy tej samej rzeczy. Mówimy, że kwarki występują w sześciu zapachach. Dzięki temu możemy łączyć rozmaite kwarki tak, by powstały z nich wszelkie rodzaje materii. Dlatego nie potrzeba odrębnych zapachów kwarków dla różnych typów obiektów we Wszechświecie - osobno dla ognia, osobno dla tlenu, osobno dla ołowiu - tak jak to jest w twoim modelu.

DEMOKRYT: Jak łączą się te kwarki?

LEDERMAN: Poprzez silne oddziaływanie - bardzo dziwny rodzaj siły, zachowującej się inaczej niż oddziaływanie elektryczne, które także odgrywa tu pewną rolę.

DEMOKRYT: Tak, słyszałem coś o elektryczności. Rozmawiałem trochę na ten temat z Faradayem w XIX wieku.

LEDERMAN: Znakomity uczoney.

DEMOKRYT: Może i tak, ale matematyk z niego kiepski. Nigdy by sobie nie poradził tam, gdzie ja studiowałem - w Egipcie. Ale wróćmy do tematu. Mówisz, silne oddziaływanie. Czy chodzi ci o oddziaływanie grawitacyjne, o którym już coś słyszałem?

LEDERMAN: Grawitacja? O wiele za słaba. Kwarki trzymają się razem dzięki cząstkom zwanym gluonami.

DEMOKRYT: O, teraz jakieś gluony! Mówisz teraz o zupełnie innych cząstkach, a ja już myślałem, że materia zbudowana jest z kwarków.

LEDERMAN: Tak jest w istocie, ale nie zapominaj o siłach. Są też cząstki, które nazywamy bozonami cechowania. Mają one pewną misję do spełnienia: ich zadanie polega na przenoszeniu informacji o oddziaływaniu od cząstki A do cząstki B. Inaczej, skąd cząstka B mogłaby wiedzieć, że A wywiera na nią jakiegokolwiek oddziaływanie?

DEMOKRYT: Hej, heureka! Cóż to za wspaniała grecka idea! Bardzo by się podobala Talesowi.

LEDERMAN: Bozony cechowania - nośniki oddziaływania, czy też, jak je czasem zwiemy, przekaźniki oddziaływania - są obdarzone określonymi własnościami: masą, spinem, ładunkiem elektrycznym - które determinują zachowanie siły. I tak na przykład fotony, będące nośnikami oddziaływania elektromagnetycznego, mają zerową masę, dzięki czemu mogą poruszać się z wielką prędkością. Dlatego też oddziaływanie to ma

bardzo wielki zasięg. Silne oddziaływanie, którego nośnikami są gluony o zerowej masie, także sięga w nieskończoność, ale jest tak silne, że kwarki nigdy nie mogą zbyt oddalić się od siebie. Ciężkie cząstki W i Z, które przenoszą tak zwane oddziaływanie słabe, mają bardzo niewielki zasięg. Działają tylko na bardzo małe odległości. Jest także cząstka przenosząca oddziaływanie grawitacyjne, nazwana grawitonem. Niestety, żadnego grawitonu jeszcze nie widzieliśmy, nie dysponujemy nawet porządną teorią grawitacji.

DEMOKRYT: I to właśnie nazywasz modelem „prostszy” od mojego?

LEDERMAN: A jak wy, atomiści, tłumaczyliście występowanie rozmaitych sił?

DEMOKRYT: Nie tłumaczyliśmy. Wiedzieliśmy z Leukiposem, że atomy muszą być w ciągłym ruchu i po prostu pogodziliśmy się z tym faktem. Nie podawaliśmy powodów, dla których miałyby pojawić się w świecie ten nieustanny ruch atomów. Może co najwyżej w takim milezyjskim sensie, że ruch niejako należy do istoty atomu, jest jednym z jego nieodłącznych atrybutów. Świat jest, jaki jest, i trzeba zaakceptować pewne jego podstawowe cechy. Mimo wszystkich waszych teorii wyjaśniających cztery rodzaje sił, nie możesz chyba odmówić słuszności temu podejściu?

LEDERMAN: Rzeczywiście. Ale czy znaczy to, że atomiści wierzyli w przeznaczenie lub przypadek?

DEMOKRYT: Wszystko, co istnieje w świecie, jest owocem przypadku i konieczności.

LEDERMAN: Przypadek i konieczność - dwa przeciwieństwa.

DEMOKRYT: Niemniej przyroda jest im obu podporządkowana. Wiadomo, że z nasienia maku zawsze wyrośnie mak, nigdy oset. W ten sposób przejawia się konieczność. Ale liczba nasion maku uformowanych w wyniku zderzeń między atomami bywa zupełnie przypadkowa.

LEDERMAN: Czy chcesz przez to powiedzieć, że zestaw kart, jakie przyroda rozda w pokerowej rozgrywce życia, jest przypadkowy, ale w sposób konieczny wynikają z niego określone konsekwencje?

DEMOKRYT: Prostackie porównanie, ale rzeczywiście, chyba tak to działa. Czy ten sposób widzenia jest ci obcy?

LEDERMAN: Nie, to, o czym mówisz, bardzo przypomina jedną z fundamentalnych koncepcji współczesnej fizyki. Nazywamy ją teorią kwantów.

DEMOKRYT: O tak, chodzi ci o tych młodych Turków z lat dwudziestych i trzydziestych tego stulecia. Nie zabawiłem w tej erze zbyt długo. Te wszystkie kłótnie z niejakim Einsteinem... Nie widziałem w tym za grosz sensu.

LEDERMAN: Nie podobały ci się te wspaniałe debaty między koterią kwantowców - Nielsem Bohrem, Wernerem Heisenbergiem, Maxem Bornem i innymi - a takimi fizykami, jak Erwin Schrödinger i Albert Einstein, którzy sprzeciwiali się idei przypadku rządzącego przyrodą?

DEMOKRYT: Nie zrozum mnie źle, uważam, że oni wszyscy byli bardzo uzdolnieni. Ale ich polemiki nieodmiennie kończyły się tym, że jedna lub druga strona wzywała imienia Pańskiego i odwoływała się do domniemanych boskich motywacji.

LEDERMAN: Einstein powiedział, że nie może zaakceptować Boga, który gra w kości.

DEMOKRYT: Tak, kiedy dyskusja kiepsko idzie, zawsze się wyciąga atutową kartę boskiej interwencji. Wierz mi, miałem tego pod dostatkiem w starożytnej Grecji. Nawet

mój obrońca, Arystoteles, nie mógł mi darować moich przekonań dotyczących przypadku i ruchu (który traktowałem jako coś danego).

LEDERMAN: Jak ci się podobała teoria kwantów?

DEMOKRYT: Zdecydowanie mi się podobała, jak sądzę. Spotkałem potem Richarda Feynmana; przyznał mi się, że sam też jej nie rozumiał. Zawsze miałem problem z... Czekać, odeszliśmy od tematu! Wróćmy do tych prostych cząstek, o których tyle mi nagadałeś. Wyjaśniałeś mi, jak łączą się kwarki, by powstały... By co powstało?

LEDERMAN: Kwarki są składnikami wielkiej klasy obiektów, zwanych hadronami. To od greckiego słowa oznaczającego „ciężki”.

DEMOKRYT: Czyżby?

LEDERMAN: No właśnie. Najślawniejszym obiektem zbudowanym z kwarków jest proton. Składają się nań trzy kwarki. W rzeczy samej, bardzo wielu kuzynów protonu składa się z trzech kwarków. Przy sześciu różnych kwarkach istnieje mnóstwo potrójnych kwarkowych kombinacji; zdaje się, że dokładnie 216. Odkryto już większość z nich. Hadrony te nazwano literami alfabetu greckiego, takimi jak lambda (Λ), sigma (Σ) itd.

DEMOKRYT: I proton jest jednym z hadronów?

LEDERMAN: Tak. I najbardziej powszechnym w naszym Wszechświecie. Można zlepić trzy kwarki i otrzymać proton albo neutron. Dodając do protonu elektron (należy on do grupy cząstek, zwanej leptonami), można otrzymać atom. Ten konkretny atom to atom wodoru. Z ośmiu protonów, tyluż neutronów i elektronów składa się atom tlenu. Neutrony i protony trzymają się razem w maciupieńkiej grudce, zwanej jądrem. Zlep dwa atomy wodoru z jednym atomem tlenu, a otrzymasz wodę. Trochę wody, trochę węgla, trochę tlenu, parę atomów azotu, a wcześniej czy później pojawią się komary, konie i Grecy.

DEMOKRYT: I to wszystko zaczyna się od kwarków?

LEDERMAN: Aha.

DEMOKRYT: I nic więcej już nie potrzeba?

LEDERMAN: Niezupełnie. Potrzebne jest coś, co utrzyma atomy w całości i pozwoli im łączyć się w grupy.

DEMOKRYT: Znowu gluony?

LEDERMAN: Nie, one łączą tylko kwarki.

DEMOKRYT: Ο ρετυ! [O rety!]

LEDERMAN: Tu właśnie na scenie pojawiają się Faraday i inni elektrycy, tacy jak Charles Coulomb. Badali oni siły elektryczne utrzymujące elektron przy jądrze. Atomy przyciągają się nawzajem dzięki skomplikowanemu tańcowi jąder i elektronów.

DEMOKRYT: Czy te elektrony mają też coś wspólnego z elektrycznością?

LEDERMAN: Jest to jedno z ich podstawowych zadań.

DEMOKRYT: To one są bozonami cechowania, podobnie jak fotony oraz cząstki W i Z?

LEDERMAN: Nie, elektrony są cząstkami materii. Należą do rodziny leptonów. Kwarki i leptony są składnikami materii. Fotony, gluony, cząstki W i Z oraz grawitony to składniki oddziaływań. Jednym z ciekawszych aspektów powstającego obecnie obrazu rzeczywistości jest to, że zacierają się różnica między siłami a materią. Wszystko składa się z cząstek. Osiągnęliśmy nowy poziom prostoty.

DEMOKRYT: To ja już wolę mój system. Moja złożoność wygląda prościej od twojej prostoty. A jakie są te pozostałe leptony?

LEDERMAN: Mamy trzy rodzaje neutrin i jeszcze dwa leptony, zwane mion i taon. Ale na razie nie zatrzymujemy się nad tym; w dzisiejszej globalnej gospodarce elektron jest zdecydowanie najważniejszym leptonem.

DEMOKRYT: Mam więc zwracać uwagę tylko na elektron i sześć kwarków. To powinno wystarczyć dla wyjaśnienia ptaków, morza i chmur?

LEDERMAN: Prawdę mówiąc, prawie wszystko we współczesnym świecie składa się tylko z dwóch kwarków - górnego u i dolnego d oraz z elektronów. Neutrino wędruje sobie bez przeszkód po całym Wszechświecie i wyskakuje z radioaktywnych jąder. Natomiast większość pozostałych cząstek trzeba wyprodukować w laboratoriach.

DEMOKRYT: No to po co nam one?

LEDERMAN: Dobre pytanie. Wierzymy, że materia zbudowana jest z dwunastu elementarnych cząstek - sześciu kwarków i sześciu leptonów. Obecnie tylko niektóre z nich występują obficie w przyrodzie, ale wszystkie były jednakowo powszechne podczas Wielkiego Wybuchu, w momencie narodzin Wszechświata.

DEMOKRYT: I kto w to wszystko wierzy, w te sześć kwarków i sześć leptonów? Garstka fizyków, paru odszczepieńców czy może wszyscy?

LEDERMAN: Wszyscy, a w każdym razie wszyscy rozsądni fizycy zajmujący się cząstkami elementarnymi. Ale ogólna koncepcja została zaakceptowana przez całe środowisko naukowe, zaufali nam w tym względzie.

DEMOKRYT: Czym więc różnią się nasze poglądy? Twierdziłem, że istnieją niepodzielne atomy. Wiele, wiele rodzajów atomów. Że łączą się dzięki komplementarności kształtów. Ty twierdzisz, że jest tylko sześć, czy dwanaście takich a-tomów; nie mają one kształtu, natomiast łączą się ze sobą dzięki komplementarnym ładunkom elektrycznym. Twoje kwarki i leptony też są niepodzielne. Tylko, czy jesteś pewien, że jest ich właśnie tyle - dwanaście?

LEDERMAN: To zależy, jak je liczyć. Jest też sześć antykwarków i sześć antyleptonów.

DEMOKRYT: Να γιατίε Ζευσα Γρομουλαδνεγο! [Na gacie Zeusa Gromowładnego!]

LEDERMAN: Nie jest tak źle, jakby się mogło wydawać. Łączy nas więcej, niż nas dzieli. Ale pomimo tego, co mi powiedziałeś, wciąż nie mogę pojąć, że tak prymitywni i niedouczeni poganie mogli wpaść na trop a-tomu, zwanego przez nas kwarkiem. Jakie eksperymenty przeprowadziliście, by zweryfikować wasze idee? My tu wydajemy miliardy drachm, by sprawdzić każde pojęcie, każdą hipotezę. Jak się to wam udało bez wielkich pieniędzy?

DEMOKRYT: Robiliśmy to staroświeckim sposobem. Nie mając Departamentu Energii ani Narodowej Fundacji Nauki, musieliśmy się uciec do Czystego Rozumu.

LEDERMAN: Więc po prostu wymyśliliście te wasze teorie?

DEMOKRYT: Nie, nawet my, starożytni Grecy, dostrzegaliśmy w przyrodzie wskazówki, które pozwalały nam kształtować nasze koncepcje. Jak już mówiłem, widzieliśmy, że z nasion maku zawsze wyrasta mak. Po zimie zawsze przychodzi wiosna. Słońce wschodzi i zachodzi. Empedokles badał zegary wodne i wirujące wiaderka. Do pewnych wniosków można po prostu dojść, mając oczy otwarte.

LEDERMAN: „Można wiele zobaczyć, jeśli tylko się patrzy” - powiedział kiedyś jeden z moich współczesnych.

DEMOKRYT: Dokładnie! Cóż to za mędrzec, tak grecki w swej filozofii?

LEDERMAN: Miś Yogi.

DEMOKRYT: Niewątpliwie jeden z waszych największych filozofów.

LEDERMAN: Można tak powiedzieć. Ale dlaczego tak bardzo nie ufaliście eksperymentowi?

DEMOKRYT: Umysł jest lepszy niż zmysły. Zawiera prawdziwą wiedzę. Drugi rodzaj wiedzy to fałszywa wiedza pochodząca ze zmysłów: wzroku, słuchu, węchu, smaku i dotyku. Pomyśl tylko: napój, dla ciebie słodki, dla mnie może być kwaśny. Kobieta, która tobie zdaje się piękna, wcale mi się nie podoba. Brzydkie dziecko jest śliczne w oczach swej matki. I jak tu zaufać takim informacjom?

LEDERMAN: Uważasz więc, że nie możemy dokonać pomiarów świata zewnętrznego? Że nasze zmysły po prostu fabrykują dane?

DEMOKRYT: Nie, nasze zmysły nie tworzą wiedzy z niczego. Przedmioty wydzielają swoje atomy, dzięki czemu możemy je widzieć lub wyczuwać - jak ten bochen chleba, o którym ci opowiadałem. Te atomy/obrazy docierają do nas dzięki narządom zmysłów, które stanowią wrota duszy. Ale obrazy ulegają zniekształceniu, gdy przemieszczają się w powietrzu. Dlatego właśnie odległe przedmioty mogą być zupełnie niewidoczne. Nie można polegać na informacji o rzeczywistości, dostarczanej nam przez zmysły. Wszystko jest subiektywne.

LEDERMAN: Czy według ciebie nie istnieje żadna obiektywna rzeczywistość?

DEMOKRYT: Oczywiście, że istnieje, ale nie postrzegamy jej w adekwatny sposób. Kiedy jesteś chory, wszystko inaczej ci smakuje. Woda, dotykana jedną ręką, może się wydawać ciepła, a drugą - zimna. Wszystko to zależy od chwilowej konfiguracji atomów składających się na nasze ciało i ich reakcji na równie przelotne ułożenie atomów w przedmiotach. Prawda musi leżeć głębiej niż tam, dokąd można sięgnąć zmysłami.

LEDERMAN: Mierzony przedmiot i narzędzie pomiaru - w tym wypadku nasze ciało - oddziałują na siebie nawzajem, przez co zmienia się natura przedmiotu i w ten sposób ulega zakłóceniu sam akt pomiaru.

DEMOKRYT: Dziwaczny sposób wyrażania myśli, ale rzeczywiście, zgadzam się z tym. Do czego zmierzasz?

LEDERMAN: No cóż, zamiast nazywać to fałszywą wiedzą, można na całość zagadnienia spojrzeć jako na kwestię nieoznaczoności pomiaru czy wrażenia.

DEMOKRYT: Zgoda. Heraklit powiedział: „Zmysły są złymi świadkami”.

LEDERMAN: A czy umysł jest lepszy, nawet jeśli zwiesz go źródłem prawdziwej wiedzy? Umysł, według twojego światopoglądu, jest atrybutem tego, co zwiesz duszą, która z kolei sama zbudowana jest z atomów. Czyż te atomy nie pozostają w nieustannym ruchu i czy nie oddziałują ze zniekształconymi atomami/obrazami pochodzącymi z zewnątrz? Czy w ogóle możliwe jest zupełne oddzielenie wrażenia od myśli?

DEMOKRYT: Słuszna uwaga. Jak już kiedyś powiedziałem: „Biedny Umysł, wywodzi się z nas”. Ze zmysłów. A jednak Czysty Rozum jest bardziej godny zaufania niż zmysły. Nie mam przekonania do twoich eksperymentów. Te ogromne budynki ze wszystkimi drutami i maszynami wydają mi się niemalże śmieszne.

LEDERMAN: Być może. Ale stanowią one pomnik wzniesiony trudnościom, które nie pozwalają nam zaufać temu, co widzimy, słyszymy i czego dotykamy. Od XVI do XVIII wieku powoli zaczynaliśmy rozumieć twoje uwagi na temat subiektywności pomiaru. Po trochu uczyliśmy się redukować obserwację i pomiar do obiektywnych aktów, takich jak zapisywanie liczb w notesie. Nauczyliśmy się rozpatrywać hipotezy, idee, procesy przyrodnicze z wielu punktów widzenia i w wielu laboratoriach, tak długo, aż

na drodze powszechnego porozumienia wyłoniło się najlepsze przybliżenie obiektywnej rzeczywistości. Skonstruowaliśmy wspaniałe urządzenia pomagające nam w prowadzeniu obserwacji, ale nauczyliśmy się też nie ufać całkowicie temu, co nam one ukazują, dopóki nie otrzymamy podobnego rezultatu w wielu miejscach przy użyciu wielu technik. Wreszcie, wszystkie konkluzje poddajemy próbie czasu. Jeśli po stu latach jakiś młody, żądny sławy pętał wszystko pada w wątpliwość, to niechże i tak będzie. Nagradzamy go i chwalimy. Nauczyliśmy się tłumić zazdrość i strach, i kochać gnojka.

DEMOKRYT: A co z autorytetami? O moich pracach świat dowiedział się głównie za pośrednictwem Arystotelesa. To mi dopiero autorytet! Wypędzano, więziono i palono tych, którzy śmieli nie zgadzać się ze starym Arystotelesem. Idea atomu tylko z najwyższym trudem przetrwała do czasów renesansu.

LEDERMAN: Teraz jest znacznie lepiej. Nie idealnie, ale lepiej. Dziś właściwie można określić kaliber naukowca na podstawie tego, jak sceptycznie podchodzi do autorytetów.

DEMOKRYT: Na Zeusa, to dobra nowina! Ile płacie dojrzałym uczonym, którzy nie myją okien i nie robią eksperymentów?

LEDERMAN: Widzę, że masz zamiar ubiegać się o posadę teoretyka. Nie zatrudniam ich wielu, choć zapewniam bardzo korzystne godziny pracy. Teoretycy nigdy nie planują spotkań na środy, bo by im to spało dwa weekendy. Zresztą ty sam nie jesteś tak przeciwny eksperymentom, jak próbujesz mi to wmówić. Czy ci się to podoba, czy nie, robiłeś doświadczenia.

DEMOKRYT: Tak?

LEDERMAN: Oczywiście, przypomnij sobie swój nóż. Był to eksperyment myślowy, ale jednak eksperyment. Przecinając w myśli kawałek sera, doszedłeś do teorii atomowej.

DEMOKRYT: Tak, ale to wszystko odbyło się w myśli, dzięki Czystemu Rozumowi.

LEDERMAN: A co byś powiedział, gdybym pokazał ci ten nóż?

DEMOKRYT: O czym ty mówisz?

LEDERMAN: Co byś powiedział, gdybym pokazał ci nóż, którym można kroić materię tak długo, aż wreszcie dojdzie się do a-tomu?

DEMOKRYT: Znalazłeś nóż do odkrawania atomów? W tym mieście?

LEDERMAN [*kiwa potakująco głową*]: Siedzimy właśnie na jego głównej części.

DEMOKRYT: To laboratorium jest twoim nożem?

LEDERMAN: Akcelerator cząstek. Pod naszymi nogami cząstki mkną wkoło w sześciokilometrowej rurze i zderzają się ze sobą.

DEMOKRYT: I w ten właśnie sposób siekasz materię, by dostać się do a-tomu?

LEDERMAN: Do kwarków i leptonów.

DEMOKRYT: Imponujące. Jesteś pewien, że nie ma niczego mniejszego?

LEDERMAN: O tak, zupełnie pewien... zdaje się... chyba.

DEMOKRYT: No, tak, nie jesteś całkowicie przekonany, bo przecież w przeciwnym wypadku przestałbyś „siekać”.

LEDERMAN: Siekanie pozwala nam dowiedzieć się czegoś o własnościach kwarków i leptonów, nawet jeśli te cząstki nie składają się z jakichś jeszcze mniejszych wirujących ludzików.

DEMOKRYT: Zapomniałem o coś zapytać. Skoro wszystkie kwarki są pozbawione rozmiarów, czym się różnią między sobą, pomijawszy ich ładunek elektryczny?

LEDERMAN: Mają różne masy.

DEMOKRYT: Niektóre są ciężkie, a inne lekkie?

LEDERMAN: Da.

DEMOKRYT: Zadziwiająco.

LEDERMAN: Co? To, że mają różne masy?

DEMOKRYT: To, że w ogóle mają jakąkolwiek masę. Moje atomy nic nie ważą. Nie przeszkadza ci, że twoje kwarki mają masę? Potrafisz to wyjaśnić?

LEDERMAN: Tak, bardzo mi to przeszkadza; i nie, nie potrafię tego wyjaśnić. Ale na taki właśnie stan rzeczy wskazują nasze eksperymenty. Z bozonami przenoszącymi oddziaływania jest jeszcze gorzej. Rozsądne teorie przewidują, że ich masa powinna wynosić zero, nic, koło, ale...

DEMOKRYT: Każdy ciemny naprawiacz garnków w Tracji znalazłby się w podobnym kłopotcie. Podnosisz kamień, wydaje się ciężki; podnosisz kłęb wełny - lekki. Z doświadczenia nabytego w tym świecie wynika, że atomy - albo i kwarki - mają różne masy. Ale, wiadomo, zmysły są złymi świadkami. Używając Czystego Rozumu, w ogóle nie widzę powodu, dla którego materia miałaby mieć jakąkolwiek masę. Potrafisz to wyjaśnić? Skąd cząstki mają masę?

LEDERMAN: To jest zagadka. Wciąż zmagamy się z tym problemem. Jeśli pokręcisz się tu jeszcze przez jakiś czas, aż dojdziemy do ósmego rozdziału tej książki, to spróbujemy całą rzecz wyjaśnić. Podejrzewamy, że masa pochodzi od pola.

DEMOKRYT: Od pola?

LEDERMAN: Teoretycy nazywają je polem Higgsa. Przenika całą przestrzeń, *apeiron*, wypełnia próżnię, szarpie materię i czyni ją ciężką.

DEMOKRYT: Higgs? Co za Higgs? Dlaczego nikt nie nazwie niczego na moją cześć - demokryton na przykład. Wygląda na to, iż wiecie, że to pole oddziałuje ze wszystkimi cząstkami.

LEDERMAN: Przykro mi, teoretyk zawsze nadaje wszystkiemu albo swoje imię, albo innego zaprzyjaźnionego teoretyka.

DEMOKRYT: Co to za pole?

LEDERMAN: Pole reprezentowane jest przez cząstkę, zwaną bozonem Higgsa.

DEMOKRYT: Cząstkę! Już mi się zaczyna podobać ten pomysł. I znaleźliście tę cząstkę w akceleratorach?

LEDERMAN: No, nie.

DEMOKRYT: To gdzie ją znaleźliście?

LEDERMAN: Jeszcze jej nie znaleźliśmy. Istnieje tylko w zbiorowej świadomości fizyków. W czymś jakby na kształt Nieczystego Rozumu.

DEMOKRYT: Dlaczego w nią wierzycie?

LEDERMAN: Bo musi istnieć. Kwarki, leptony, cztery znane oddziaływania - nie sposób ich wszystkich zupełnie zrozumieć, o ile nie założymy działania masywnego pola, które zniekształca to, co widzimy, i fałszuje rezultaty eksperymentów. Droga dedukcji dochodzimy do tego, że Higgs musi działać.

DEMOKRYT: Jakbym słyszał Greka. Podoba mi się to pole Higgsa. No cóż, na mnie już pora. Słyszałem, że w XXI wieku jest posezonowa wyprzedaż sandałów. Zanim wyruszę dalej w przyszłość, chciałbym usłyszeć twoje sugestie, kiedy powinienem się udać i dokąd, żeby być świadkiem jakichś istotnych wydarzeń na drodze poszukiwań mojego atomu?

LEDERMAN: Dwie daty i dwa miejsca. Proponuję, byś najpierw wrócił tu, do Batawii, w 1995 roku. Potem spróbuj zajrzeć do Waxahachie w Teksasie około roku 2005.

DEMOKRYT [*parskając*]: Och, daj spokój. Wy, fizycy, wszyscy jesteście jednakowi. Myślicie, że uda się wam wszystko uporządkować w ciągu paru lat. Widziałem się z lordem Kelvinem w 1900 roku i z Murrayem Gell-Mannem w 1972 roku. Obaj zapewniali mnie, że fizyka już się skończyła, że wszystko zostało już wyjaśnione. Obaj kazali mi wracać po sześciu miesiącach, kiedy to miano już rozpracować ostatnie szczegóły.

LEDERMAN: Ja niczego podobnego nie twierdzę.

DEMOKRYT: Mam nadzieję, że nie. Przemierzam już tę Drogę od dwóch i pół tysiąca lat. To nie takie proste.

LEDERMAN: Wiem. Mówię, abys wrócił w 1995 i w 2005 roku, bo możesz być wówczas świadkiem pewnych interesujących wydarzeń.

DEMOKRYT: Jakich na przykład?

LEDERMAN: Jest sześć kwarków, pamiętasz? Dotąd znaleźliśmy tylko pięć z nich. Ostatni odkryliśmy tu, w Fermilabie, w 1977 roku. Musimy znaleźć szósty i ostatni, a przy tym najcięższy kwark. Nazywamy go kwarkiem szczytowym - *t*.

DEMOKRYT: Zaczniecie go szukać w 1995 roku?

LEDERMAN: Już szukamy, nawet w tej chwili. Cząstki, które wirują nam pod nogami, są rozcinane i starannie badane w poszukiwaniu tego kwarka. Jeszcze go nie mamy, ale na pewno znajdziemy go przed końcem 1995... albo udowodnimy, że nie istnieje.¹

DEMOKRYT: Możecie to zrobić?

LEDERMAN: Tak, nasza maszyna ma dość mocy i jest wystarczająco precyzyjna. Jeśli go znajdziemy, to wszystko w porządku. Odkrycie posłuży nam do umocnienia koncepcji, mówiącej, że sześć kwarków i sześć leptonów to właśnie twoje a-tomy.

DEMOKRYT: A jeśli nie?

LEDERMAN: Wówczas wszystko się zawali. Nasze teorie i cały model standardowy okażą się bezwartościowe. Teoretycy będą skakać z okien pierwszego piętra i podcinać sobie żyły nożami do masła.

DEMOKRYT [*śmiejąc się*]: Ale będzie śmiesznie! Masz rację, wrócę do Batawii w 1995 roku.

LEDERMAN: Muszę cię też ostrzec, że może to oznaczać koniec twojej teorii.

DEMOKRYT: Moja teoria przetrwała już wiele, młody człowieku. Jeśli nawet ani kwark, ani lepton nie są moimi a-tomami, to i tak wcześniej czy później pojawią się one w jakiejś innej postaci. Zawsze tak było. Ale powiedz mi, dlaczego w 2005 roku i gdzie jest to Waxahachie?

LEDERMAN: W Teksasie, na pustyni. Tam właśnie budujemy największy w historii akcelerator cząstek. To będzie największe narzędzie naukowe od czasu piramid. (Nie wiem, kto je projektował, ale moi przodkowie odwalili przy nich kawał dobrej roboty). SSC, nasza nowa maszyna, powinien w roku 2005 działać już pełną parą - plus minus parę lat w zależności od tego, kiedy Kongres przyjmie budżet.

DEMOKRYT: Co takiego odkryjecie dzięki temu nowemu akceleratorowi?

LEDERMAN: Bozon Higgosa. Będziemy mogli dopaść pole i spróbujemy schwytać cząstkę Higgosa. Mamy nadzieję, że pozwoli nam to wreszcie dowiedzieć się, dlaczego rzeczy mają ciężar i dlaczego świat sprawia wrażenie tak skomplikowanego, choć obaj doskonale wiemy, iż w głębi jest naprawdę prosty.

¹ Autor się nie mylił. W 1994 roku, 26 kwietnia zespół uczonych z Fermilabu doniósł o odkryciu kwarka *t* (przyp. red.).

DEMOKRYT: Jak grecka świątynia.

LEDERMAN: Albo cheder w Bronxie.

DEMOKRYT: Muszę zobaczyć tę maszynę. I cząstkę też... Bozon Higgsa - niezbyt poetycka nazwa.

LEDERMAN: Ja go nazywam Boską Cząstką.

DEMOKRYT: Znacznie lepiej. Choć raczej wolałbym przez małe „b”. Ale powiedz mi - jesteś przecież w tej sprawie ekspertem - jakie zebraliście dotąd materialne dowody świadczące o istnieniu Higgsa?

LEDERMAN: Żadne. Zero. Nic. W gruncie rzeczy, poza Czystym Rozumem dane, którymi dysponujemy, wystarczą, by przekonać każdego rozsądnego fizyka, że bozony Higgsa nie istnieją.

DEMOKRYT: A jednak nie dajecie za wygraną?

LEDERMAN: Dane, które zdają się przeczyć istnieniu Higgsa, są tylko danymi wstępnymi. Zresztą mamy tu pewne powiedzonko...

DEMOKRYT: Tak?

LEDERMAN: „Nic nie jest skończone, dopóki się nie skończy”.

DEMOKRYT: Miś Yogi?

LEDERMAN: Aha.

DEMOKRYT: Geniusz.

Na północnym wybrzeżu Morza Egejskiego, w greckiej prowincji zwanej Tracją, u ujścia rzeki Nestos leży miasto Abdera. Podobnie jak w wielu innych miastach w tej części świata, historia zapisana jest na kamieniach wzgórz, które otaczają dzisiejsze supermarkety, parkingi i kina. Prawie 2400 lat temu miasto to leżało na uczęszczanym szlaku lądowym łączącym Grecję z ważnymi koloniami w Jonii - obecnie zachodniej części Turcji. W Abderze osiedlali się Jonowie szukający schronienia przed armią Cyrusa Wielkiego.

Wyobraź sobie, drogi Czytelniku, życie w Abderze w V wieku p.n.e. W tej ziemi pasterzy kóz zjawisk przyrodniczych nie tłumaczono zazwyczaj w sposób naukowy. Piorun uderzał, gdy rozgniewany Zeus ciskał błyskawicę ze szczytu Olimpu. Czy żegludze towarzyszyło spokojne, czy wzburzone morze, zależało od zmiennych nastrojów Posejdon. Nie warunki atmosferyczne, lecz zachcianki kapryśnej Ceres - bogini rolnictwa - sprowadzały na ludzi głód lub obfitość. Wyobraźmy sobie zatem, jak wielkiego umysłu było trzeba, by zignorować cały system powszechnie panujących wierzeń i stworzyć koncepcję zbieżną z kwarkami i teorią kwantową. W starożytnej Grecji postęp zależał - zresztą podobnie jest i teraz - od przypadkowego pojawienia się geniusza, twórczej osoby obdarzonej wyobraźnią. Ale nawet jak na geniusza Demokryt znacznie wyprzedzał swoją epokę.

Demokryt jest chyba najbardziej znany z dwóch sentencji, które trafniej wyrażają głęboką intuicję naukową niż jakiegokolwiek stwierdzenia innych starożytnych: „Nie istnieje nic oprócz atomów i przestrzeni, wszystko inne jest opinią” oraz „Wszystko, co istnieje we Wszechświecie, jest dziełem przypadku i konieczności”. Musimy oczywiście oddać sprawiedliwość poprzednikom Demokryta, docenić ich kolosalne osiągnięcia. Ludzie ci wytyczyli cel misji: u podstaw chaosu dostępnego naszym zmysłom leży jednorodny porządek, co więcej, jesteśmy w stanie go pojąć.

Liczne podróże zapewne przyczyniły się do ukształtowania poglądów Demokryta. „Zwiedziłem więcej lądów niż którykolwiek z moich współczesnych, prowadząc różno-

rodne badania; i zobaczyłem więcej krain, i wysłuchałem najślawniejszych mędrców”. Studiował astronomię w Egipcie i matematykę w Babilonii. Odwiedzał też Persję. Ale jego atomistyczna teoria wywodziła się z Grecji, podobnie jak jego poprzednicy: Tales, Empedokles i, oczywiście, Leukippos.

Lista publikacji Demokryta jest doprawdy imponująca! Katalog aleksandryjski wymieniał ponad 60 prac z następujących dziedzin: fizyka, kosmologia, astronomia, geografia, fizjologia, medycyna, nauka o zmysłach, epistemologia, matematyka, magnetyzm, botanika, teoria muzyki i poezji, lingwistyka, rolnictwo, malarstwo. Prawie żadne z jego dzieł nie dotrwało w całości do naszych czasów. Dowiadujemy się o nim tylko z zachowanych urywków i ze świadectw późniejszych historyków. Podobnie jak Newton, Demokryt pisywał także o magii i odkryciach alchemicznych. Jakim był człowiekiem?

Historycy nazywają go Śmiejącym się Filozofem - o śmiech przyprawiały go szaleństwa ludzkości. Podobnie jak i większość filozofów greckich, był zapewne bogaty. Wiemy, że nie pochwalał seksu. Seks jest tak przyjemny, mówi Demokryt, że opanowuje całą świadomość. Może w tym tkwi jego sekret, być może powinniśmy zakazać naszym teoretykom kontaktów seksualnych, aby sprawniej myśleli. (Eksperymentatorzy nie muszą myśleć i dlatego ich ten zakaz by nie dotyczył). Demokryt cenił przyjaźń, ale źle myślał o kobietach. Nie chciał mieć dzieci, gdyż trzeba je kształcić i wychowywać, a to przeszkadzałoby mu w uprawianiu filozofii. Podobno żywił niechęć do wszelkiej namiętności i gwałtu. Trudno w to uwierzyć, gdyż gwałtowność nie była mu przecież całkiem obca: atomy znajdowały się w ciągłym, gwałtownym ruchu, a bez żarliwej pasji trudno byłoby wyznawać takie poglądy. Demokryt pozostał wierny swoim przekonaniom, choć nie przyniosły mu sławy. Arystoteles go cenił, ale Platon chciał zniszczyć wszystkie jego dzieła. W Abderze Demokryt ustępował sławą swemu współziomkowi, Protagorasowi, który był najwybitniejszym z sofistów, przedstawicielem szkoły filozoficznej zajmującej się między innymi nauczaniem bogatych młodzieńców retoryki. Gdy Protagoras opuścił Abderę i dotarł do Aten, przyjęto go tam „entuzjastycznie”. Demokryt natomiast powiedział: „Udałem się do Aten i nikt mnie nie znał”.

Demokryt wierzył też w wiele innych rzeczy, o których nie było mowy w naszej mitycznej, sennej dyskusji, skłeczonej z paru cytatów z jego pism, przyprawionych pewną dozą wyobraźni. Pozwoliłem sobie na swobodę przy konstruowaniu jego wypowiedzi, ale tylko tam, gdzie nie dotyczyły one jego podstawowych przekonań. Nie mogłem sobie natomiast odmówić przyjemności przekonania go o wartości eksperymentów. Jestem pewny, że byłby bardzo zadowolony, widząc swój mityczny nóż urzeczywistniony w postaci trzewi Fermilabu.

Prace Demokryta nad próżnią miały rewolucyjny charakter. Wiedział na przykład, że przestrzeń nie ma góry, dołu ani środka. Choć po raz pierwszy zasugerował to Anaksymander, to przecież uznanie takiej prawdy było nie lada osiągnięciem dla człowieka urodzonego na tej planecie w epoce powszechnie panującego geocentryzmu. Także i teraz, mimo zdjęć satelitarnych ukazujących przestrzeń kosmiczną, większości ludzi trudno jest pogodzić się z faktem, że „góra” czy „dół” to pojęcia umowne. Jednym z bardziej niekonwencjonalnych poglądów Demokryta było przekonanie o istnieniu niezliczonych światów o różnych rozmiarach. Światy te rozmieszczone są nieregularnie, w niektórych obszarach gęściej, w innych rzadziej. Niektóre się rozwijają, inne chylą ku upadkowi. Tu powstają, ówdzie giną na skutek zderzeń z innymi światami. W niektórych z nich nie istnieje życie i nie ma wody. Dziwne, a jednak można porównać tę koncepcję do współczesnych teorii kosmologicznych, związanych z tak zwanym inflacyjnym

modelem Wszechświata, według którego z już istniejących wszechświatów nieustannie pączkują następne. I wszystko to znajdujemy u Śmiejącego się Filozofa, który przemierzał świat ponad dwa tysiące lat temu.

Paradoks wyrażony w jego słynnym zdaniu, mówiącym, że wszystko jest „dziełem przypadku i konieczności”, znajdujemy szczególnie dobitnie wyrażony w mechanice kwantowej, jednej z wielkich teorii XX wieku. Poszczególne zderzenia atomów, mówił Demokryt, niosą nieuniknione konsekwencje. Rządzą tym niepodważalne zasady. Jednak to, do których zderzeń dochodzi częściej i który rodzaj atomów przeważa w danym miejscu, jest już dziełem przypadku. Wychodząc od takiego stwierdzenia, na drodze logicznego rozumowania możemy sformułować wniosek, że powstanie niemal doskonałego układu Ziemia-Słońce to wynik szczęśliwego trafu. Według współczesnej teorii kwantów, pewność i powtarzalność wyłaniają się jako zdarzenia będące średnią rozkładu reakcji o zmiennym prawdopodobieństwie. Z im większą liczbą losowo przebiegających procesów mamy do czynienia, z tym większą pewnością możemy przewidywać, co się zdarzy. Sformułowanie Demokryta jest zbieżne z naszymi poglądami. Nie można w sposób pewny przewidzieć, jaki los spotka dany atom, ale można dokładnie określić konsekwencje ruchów bardzo wielu atomów, zderzających się przypadkowo w przestrzeni.

Nawet jego nieufność wobec świadectwa zmysłów jest dla nas wyjątkowo pouczająca. Demokryt przypomina nam, że narządy zmysłów składają się z atomów, z którymi zderzają się atomy pochodzące z obiektów badanych za pomocą zmysłów. Dlatego też nasza zdolność postrzegania jest ograniczona. Jak się przekonamy, sformułowanie tego problemu przez Demokryta współbrzmi z kolejnym wielkim odkryciem naszego stulecia: z zasadą nieoznaczoności Wernera Heisenberga. Akt pomiaru wpływa na zachowanie obserwowanej cząstki. Tak, jest w tym swego rodzaju poezja.

Jakie miejsce zajmuje Demokryt w historii filozofii? Niezbyt wysokie, a już zupełnie niewysokie w porównaniu z pozycją jemu niemal współczesnych: Sokratesa, Arystotelesa i Platona. Niektórzy historycy traktują teorię atomistyczną Demokryta jako dziwaczny przypis do greckiej myśli filozoficznej. Słysząc jednak przynajmniej jeden potężny głos, który należy do doceniającej Demokryta mniejszości. Brytyjski filozof Bertrand Russell twierdził, że od czasów Demokryta filozofia nieprzerwanie się staczała aż do nadejścia renesansu. Demokryt i jego poprzednicy „podejmowali bezinteresowne próby zrozumienia świata”, pisał Russell. Ich postawa była „pełna wyobraźni i werwy, przepętniona zachwytem płynącym z przeżycia przygody. Interesowało ich wszystko - meteory i zaćmienia, ryby i wiry powietrzne, religia i moralność; łączyli w sobie przenikliwy intelekt z dziecięcym zapałem”. Nie byli zabobonni, ale autentycznie naukowcy, i nie poddawali się przesądom panującym w ich epoce.

Oczywiście Russell, podobnie jak Demokryt, był matematykiem wysokiej klasy, a ci faceci zawsze trzymają się razem. Nie ma w tym nic dziwnego, że matematyk jest przychylnie nastawiony w stosunku do tak rygorystycznych myślicieli, jak Demokryt, Leukippos czy Empedokles. Russell zwrócił uwagę, że choć Arystoteles i inni stawiali atomistom zarzut, że nie podali oni przyczyny pierwotnego ruchu atomów, to podejście Demokryta i Leukipposa było znacznie bardziej naukowe. Ich krytycy zawracali sobie głowę określeniem celu Wszechświata, podczas gdy atomiści wiedzieli, że łańcuch przyczyn musi się od czegoś zacząć i nie da się określić przyczyny tego pierwszego czegoś. Dlatego uznali, że ruch był po prostu dany. Atomiści zadawali mechanistyczne pytania i udzielali mechanistycznych odpowiedzi. Gdy pytali „dlaczego”, chodziło im o

przyczynę zjawiska. Kiedy ich następcy - Platon, Arystoteles i inni - pytali „dlaczego”, poszukiwali celu zjawiska. Niestety, ten kierunek badań, stwierdza Russell, zazwyczaj szybko doprowadza nas do Stwórcy albo przynajmniej Rzemieślnika. Stwórca musi pozostać bez wyjaśnienia, o ile nie zaproponuje się nad-stwórcy i tak dalej. Według Russella ten sposób myślenia zaprowadził naukę w ślepy zaułek, w którym tkwiła uwięziona przez stulecia.

Jaka jest nasza obecna pozycja w porównaniu z Grecją z 400 roku p.n.e.? Dzisiejszy model standardowy, sprawdzany w eksperymentach, przypomina spekulatywną teorię Demokryta. Za pomocą dwunastu cząstek materii możemy zbudować wszystko, cokolwiek istniało lub istnieje we Wszechświecie, od rosołu po gwiazdy neutronowe. Nasze a-tomy dzielą się na dwie rodziny: sześć kwarków i sześć leptonów. Kwarki zwiemy: *u* - *up* (górnny), *d* - *down* (dolny), *c* - *charm* (powabny), *s* - *strange* (dziwny), *b* - *bottom* albo *beauty* (spodni albo piękny) i *t* - *top* albo *truth* (wierzchni albo prawdziwy). Do leptonów należą: popularny elektron, neutrino elektronowe, mion, neutrino mionowe oraz taon i neutrino taonowe. Zauważ jednak, drogi Czytelniku, że użyłem sformułowania „istniało lub istnieje”. Jeśli mamy mówić o naszym obecnym środowisku - od południowych przedmieść Chicago po krańce Wszechświata - znakomicie poradzimy sobie, mając do dyspozycji mniej cząstek. Z kwarków potrzebne nam są tylko dwa: górny i dolny. Można je zestawiać w różnych kombinacjach, by otrzymać jądra atomów (tych z tablicy układu okresowego). Z leptonów nie możemy się obyć bez starego dobrego elektronu, który krąży wokół jądra, i bez neutrina odgrywającego ważną rolę w wielu reakcjach; ale po co nam mion i taon? Albo powabne, dziwne i jeszcze cięższe kwarki? Możemy wyprodukować je w akceleratorach albo obserwować w zderzeniach promieni kosmicznych. Ale skąd się one wzięły? Wrócimy jeszcze do tych „dodatkowych” a-tomów.

Patrzac w kalejdoskop

Losy atomizmu przechodziły wiele wzlotów i upadków, wiele okresów przyspieszonego rozwoju i stagnacji, zanim osiągnęliśmy model standardowy. Zaczęło się od Talesa mówiącego, że wszystko jest wodą (liczba atomów: 1). Empedokles wymyślił powietrze, ziemię, ogień i wodę (liczba: 4). Atomy Demokryta miały wiele różnych kształtów, ale w istocie były jednorodne (liczba: ?). Potem nastąpiła długa przerwa w rozwoju tej idei, choć atomy pozostawały pojęciem filozoficznym i jako takie omawiane były przez Lucrecjusza, Isaaca Newtona, Rudjera Josipa Bošcovića i wielu innych.

Wreszcie, w roku 1803 atomy zostały zredukowane przez Johna Daltona do poziomu obiektów podlegających badaniom eksperymentalnym. Potem, nie wymykając się już z dłoni chemików, liczba atomów rosła: było ich 20, 48, a na początku XX wieku już 92. Wkrótce chemicy jądrowi zaczęli produkować nowe atomy (liczba: 111 i wciąż rośnie). Lord Rutherford wykonał ogromny krok w kierunku prostoty, gdy odkrył (około roku 1910), że atom Daltona wcale nie jest niepodzielny i że składa się z jądra i elektronów (liczba: 2). Ach tak, przecież był jeszcze foton (liczba: 3). W roku 1930 okazało się, że jądro zbudowane jest z neutronów i protonów (liczba: 4). Dziś mamy 6 kwarków, 6 leptonów, 12 bozonów przenoszących oddziaływania i jeśli już ktoś się tego złośliwie domaga - można też doliczyć antycząstki i wszystkie kolory, jako że kwarki występują w trzech odcieniach (liczba: 60). Ale kto by to liczył?

Historia podpowiada, że może znajdziemy jakieś inne obiekty, nazwijmy je prekwarkami, i w ten sposób całkowita liczba cząstek materii znowu ulegnie zredukowa-

niu. Ale historia nie zawsze ma rację. Nowsze ujęcie mówi, że obserwujemy materię jakby przez zaciemnioną szybę, że nadmierne rozmnażanie się a -tomów w modelu standardowym jest konsekwencją naszego sposobu patrzenia. Dziecięca zabawka - kalejdoskop - ukazuje śliczne wzory, ponieważ lusterka są w nim tak ustawione, by prosty wzór uczynić złożonym. Niektóre układy gwiazd wydają się wytworem soczewki grawitacyjnej. Według przyjmowanej dziś tezy, bozon Higgsa, Boska Cząstka, może pozwolić zrozumieć mechanizm, który sprawia, że prosty świat pierwotnej symetrii ukrywa się za coraz bardziej skomplikowanym modelem standardowym.

W ten sposób powróciliśmy do starej debaty filozoficznej: Czy Wszechświat jest rzeczywisty? A jeśli tak, to czy możemy go poznać? Teoretycy zazwyczaj nie zmagają się z tym problemem. Po prostu przyjmują obiektywnie istniejącą rzeczywistość jako taką - podobnie jak Demokryt - i zabierają się do obliczeń. (Rozsądny wybór, jeśli mają dość do czegośkolwiek dysponując tylko ołówkiem i kartką). Ale eksperymentator, udręczony zawodnością instrumentów i zmysłów, oblewa się zimnym potem na myśl o mierzeniu rzeczywistości, która często okazuje się bardzo śliska, gdy się do niej człowiek zabiera z linijką. Czasem liczby otrzymane w wyniku eksperymentu są tak dziwne, że fizykowi włosy stają dęba.

Weźmy problem masy. Dane, które zgromadziliśmy na temat mas kwarków i cząstek W i Z są zupełnie zaskakujące. Leptony - elektron, mion i taon - okazały się cząstkami pod każdym względem identycznymi, wyjąwszy masę. Czy masa jest czymś rzeczywistym? A może jest iluzją, złudzeniem, kosmicznym artefaktem? Wedle opinii pojawiającej się to tu, to tam w latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych, coś wypełnia przestrzeń i nadaje a -tomom iluzoryczny ciężar. Pewnego dnia to „coś” objawi się naszym instrumentom pod postacią cząstki.

A tymczasem nie istnieje nic oprócz atomów i pustej przestrzeni; wszystko inne jest opinią.

Słyszę chichot starego Demokryta.

4. Interludium A: Opowieść o dwóch miastach



5. Poszukiwania atomu: mechanicy

Wam, którzy przygotowujecie obchody 350 rocznicy wydania wielkiego dzieła Galileusza, „Dialogo sopra” i „Massimi Sistemi del Mondo”, chcę powiedzieć, że doświadczenie nabyte podczas sprawy Galileusza i później sprawiło, iż Kościół wykazuje teraz dojrzałą postawę i lepiej pojmuje zakres właściwej sobie władzy. Powtarzam Wam to, co mówiłem podczas plenarnej sesji Papieskiej Akademii Nauk, 10 listopada 1979 roku: „Mam nadzieję, że teolodzy, uczeni i historycy, ożywieni duchem prawdziwej współpracy, głębiej przebadają sprawę Galileusza i, lojalnie wyznając błędy, którakolwiek strona by ich nie popełniła, pomogą przezwyciężyć nieufność, która wciąż, w opinii wielu, stanowi przeszkodę w nawiązaniu owocnej współpracy między nauką i wiarą”.
 JEGO ŚWIĄTOBLIWOŚĆ PAPIEŻ JAN PAWEŁ II, 1986

Vincenzo Galilei nie znosił matematyków. Może się to wydawać dziwne, przecież sam był całkiem niezłym matematykiem. Jednak najpierw i przede wszystkim był muzykiem, lutnistą cieszącym się we Florencji dużym uznaniem. W 1580 roku zwrócił swe zainteresowania ku teorii muzyki i stwierdził, że jest ona niepełna. Według Vincenza winę za ten stan rzeczy ponosił nieżyjący już od dwóch tysięcy lat matematyk - Pitagoras.

Pitagoras, mistyk i filozof, urodził się na greckiej wyspie Samos około stu lat przed Demokrytem. Znaczną część życia spędził w Italii, gdzie założył związek pitagorejczyków - rodzaj tajnej organizacji o surowej regule, skupiającej mężczyzn, którzy otaczali religijną czcią liczby. Pitagorejczycy nie jadal fasoli i nie podnosili upuszczonych przedmiotów. Gdy budzili się rano, starannie ścielili swe postłania, aby usunąć z nich odbicie swych postaci. Wierzyli w reinkarnację: nie bili ani nie jedli psów, które mogły być kolejnymi wcieleniami zmarłych przyjaciół.

Obsesyjnie interesowali się liczbami. Wierzyli, że rzeczy były liczbami, że nie tylko można obiekty policzyć, ale że same są liczbami, takimi jak 1, 2, 7 czy 32. Pitagoras myślał o liczbach jak o kształtach i wprowadził pojęcie kwadratów i sześciątów liczb; terminy te stosujemy do dziś. (Mówił także o liczbach owalnych i trójkątnych, ale te się jakoś nie zadomowiły w matematyce).

Pitagoras pierwszy odkrył wielką prawdę o trójkącie prostokątnym. Zauważył, że suma kwadratów przyprostokątnych jest równa kwadratowi przeciwprostokątnej - reguła ta wbijana jest do każdego nastoletniego mózgu na lekcjach geometrii od Des Moines po Ulan Bator. Tu przypomina mi się jeden z moich studentów, który został powołany do wojska i któremu sierżant tłumaczył zasady metrycznego układu jednostek:

SIERŻANT: W układzie metrycznym woda wrze przy 90 stopniach.

SZEREGOWIEC: Najmocniej przepraszam, panie sierżancie, woda wrze w temperaturze 100 stopni.

SIERŻANT: Oczywiście, co za głupia pomyłka! To kąt prosty wrze przy 90 stopniach.

Pitagorejczycy uwielbiali badać proporcje. To oni określili złoty podział - kanon piękna, według którego powstał Partenon i wiele innych greckich budowli i obrazów renesansowych.

Pitagoras był pierwszym znawcą kosmosu. To on (a nie Carl Sagan) ukuł termin *kosmos* jako odnoszący się do wszystkiego, co jest we Wszechświecie, od ludzi, przez Ziemię po gwiazdy wirujące na niebie. *Kosmos* jest nieprzetłumaczalnym słowem greckim, którego znaczenie mieści w sobie takie cechy, jak porządek i piękno. Wszechświat jest *kosmosem*, mówił, uporządkowaną całością, i każdy z nas też jest *kosmosem* (niektórzy bardziej niż inni).

Gdyby Pitagoras żył w naszych czasach, na pewno mieszkałby na wzgórzach Malibu albo gdzieś w hrabstwie Marin, w Kalifornii. Otoczony wianuszkami młodych, zago-rzałych przeciwniczek fasoli włóczyłby się po restauracjach serwujących zdrową żywność. A może byłby adiunktem na Wydziale Matematyki na Uniwersytecie Kalifornijskim w Santa Cruz.

Ale odszedłem od tematu. Zmierzałem do tego, że pitagorejczycy byli miłośnikami muzyki, do której także wprowadzili swoje zamiłowanie do liczb. Pitagoras uważał, że współbrzmienie dźwięków zależy od „dźwięcznych liczb”. Twierdził, że na doskonałe konsonanse składały się takie dźwięki, których odległości na skali muzycznej można wyrazić jako proporcje między liczbami 1, 2, 3 i 4. Suma tych liczb wynosi 10 - liczba doskonała zgodnie z ich światopoglądem. Pitagorejczycy przynosili instrumenty muzyczne na swe spotkania, które przeradzały się w *jam sessions*. Nie wiadomo, czy dobrze grali, jako że nie nagrywano jeszcze wtedy płyt kompaktowych. Mimo to jeden z późniejszych krytyków pokusił się o próbę oceny ich talentów muzycznych.

Vincenzo Galilei sądził, że pitagorejczycy musieli być zupełnie pozbawieni słuchu, skoro mieli takie właśnie, a nie inne wyobrażenie na temat konsonansu. Jego ucho mówiło mu, że Pitagoras zupełnie nie miał racji. Inni praktykujący muzycy nie zwracali po prostu uwagi na starożytnych Greków, jednak ich idee przetrwały do XVI wieku i „dźwięczne liczby” były wciąż respektowaną częścią, jeśli nie muzycznej praktyki, to w każdym razie teorii. Największym obrońcą Pitagorasa w szesnastowiecznej Italii był Gioseffo Zarlino, czołowy teoretyk muzyki w swej epoce i nauczyciel Vincenza.

Vincenzo i Zarlino wdali się w zagorzałą debatę w tej sprawie. Vincenzo zastosował rewolucyjną, jak na owe czasy, metodę dowodzenia oponentowi swej racji - eksperyment. Dzięki próbom ze strunami różnej albo jednakowej długości, ale napiętymi z różną siłą, odnalazł nowe niepitagorejskie związki matematyczne między dźwiękami muzycznymi. Niektórzy twierdzą, że Vincenzo jako pierwszy posłużył się eksperymentem, by obalić powszechnie przyjęte prawo matematyczne. Ale jeśli nawet nie był pierwszy, to w każdym razie stał na czele ruchu, który zastąpił starą polifonię nowoczesną harmoniką.

Wiemy, że eksperymenty muzyczne Vincenza miały przynajmniej jednego głęboko zainteresowanego widza. Najstarszy syn obserwował uważnie jego pomiary i obliczenia. Ojciec, doprowadzony do rozpaczycy dogmatyzmem teorii muzyki, głośno wyrzekł na głupotę matematyków. Nie wiemy, jakich słów używał, ale łatwo mogę sobie wyobrazić Vincenza wykrzykującego do syna coś w tym rodzaju: „Daj sobie spokój z tymi teoriami i głupimi liczbami. Słuchaj tego, co mówi ci własne ucho. I żebyś mi nigdy nie próbował zostać matematykiem!” Kształcił chłopca starannie, zrobił z niego sprawnego muzyka grającego na lutni i innych instrumentach. Wyćwiczył jego zmysły, ucząc go wykrywania niewłaściwej synchronizacji dźwięków, co jest zdolnością podstawową dla każdego muzyka. Ale życzył sobie, by najstarszy syn porzucił zarówno muzykę, jak i matematykę. Jako typowy ojciec, Vincenzo pragnął, by jego syn miał przyzwoite dochody - by został lekarzem.

Obserwowanie eksperymentów wywarło na młodzieńcu większy wpływ, niż Vincenzo mógł przypuszczać. Chłopiec był szczególnie zachwycony doświadczeniem, w którym ojciec regulował siłę napięcia strun za pomocą ciężarków wieszanych na ich końcach. Gdy się taką strunę szarpnęło, zachowywała się jak wahadło. Możliwe, że właśnie to sprawiło, iż młody Galilei zaczął zastanawiać się nad różnymi rodzajami ruchu we Wszechświecie.

Synowi na imię było, oczywiście, Galileo. Jego postać i osiągnięcia jaśniej takim blaskiem, że trudno nam dostrzec innych uczonych działających współcześnie z nim. Zignorował diatriby ojca skierowane przeciw czystej matematyce i został profesorem w tej dziedzinie. Ale choć ukochał rozumowanie matematyczne, uczynił je drugorzędnym wobec obserwacji i pomiaru. Można się nawet spotkać z opinią, że mistrzowski sposób, w jaki przeplatał rozumowanie z obserwacją, wyznacza narodziny „metody naukowej”.

Galileusz, Zsa Zsa Gabor i ja

Galileusz uczynił pierwszy krok. W tym i w następnych esejach prześledzimy proces kształtowania się fizyki klasycznej. Spotkamy imponującą grupę bohaterów: Galileusza, Newtona, Lavoisiera, Mendelejewa, Faradaya, Maxwella, Hertza i innych. Każdy z nich od innej strony podchodził do zagadnienia elementarnych cząstek materii. Ja natomiast z wielkim onieśmieleniem zabieram się do tego rozdziału, bo o wszystkich tych uczonych i ich dokonaniach napisano już całe tomy. Czuję się jak dziewiąty mąż Zsa Zsy Gabor. Wiem, co mam robić, ale jakiego użyć sposobu, by było to interesujące?

Dzięki postdemokrytyjskim myślicielom niewiele się działo w naukach przyrodniczych od czasu atomistów aż do początku renesansu. Między innymi dlatego Wiek Ciemny był tak ciemny. Dla studiujących historię fizyki cząstek elementarnych ma to tę niewątpliwą zaletę, że można zupełnie zignorować niemal dwa tysiące lat rozwoju myśli filozoficznej. W tym okresie dominowała w kulturze zachodniej logika Arystotelesa - geocentryczna, antropocentryczna i o głęboko religijnym zabarwieniu - stwarzając sterylne środowisko dla fizyki. Oczywiście, Galileusz nie pojawił się nagle na pełnej pułstyni. Wiele zawdzięczał Archimedesowi, Demokrytowi oraz rzymskiemu poecie i filozofowi - Lukrecjuszowi. Niewątpliwie studiował także pisma innych poprzedników, którzy teraz znani są tylko uczonym specjalistom. Galileusz uznał za słuszną teorię Kopernika (po starannym jej sprawdzeniu) i to zdeterminowało jego życie, zarówno osobiste, jak i publiczne.

W omawianym okresie zauważymy odejście od metod stosowanych przez greckich filozofów. Czysty Rozum okaże się już niewystarczający. Wkroczyliśmy w epokę eksperymentu. Jak Vincenzo tłumaczył swemu synowi, w spotkaniu między światem realnym a Czystym Rozumem (to znaczy matematyką) pośredniczą zmysły i, co ważniejsze, pomiary. Spotkamy kilka pokoleń mierniczych i teoretyków. Zobaczymy, jak wzajemne oddziaływania między tymi dwoma obozami przyczyniły się do wzniesienia wspaniałego intelektualnego gmachu, zwanego fizyką klasyczną. Z ich pracy korzystają nie tylko uczeni i filozofowie. Odkrycia tych pokoleń dały początek wielu technologiom, które sprawiły, że zmieniły się zupełnie warunki życia na naszej planecie.

Oczywiście mierniczowie są niczym bez swoich narzędzi. Były to czasy wspaniałych naukowców i równie wspaniałych narzędzi.

Kule i pochylnie

Galileusz poświęcił wiele uwagi badaniom ruchu. Niezależnie od tego, czy faktycznie zrzucił kamienie z krzywej wieży w Pizie, czy nie, jego eksperymenty zawsze poprzedzała logiczna analiza związków między odległością, czasem i prędkością. Galileusz nie badał ruchu ciał swobodnie spadających; zamiast tego zastosował pewną sztuczkę: spuszczał je po nachylonych powierzchniach (czyli po tak zwanych równiach pochyłych). Wykoncyrował, że ruch kuli toczącej się po gładkiej płycie jest ściśle związany z ruchem kuli spadającej swobodnie, przy czym płyta stanowi ogromne udogodnienie, spowalniając ruch do tego stopnia, że pozwala go zmierzyć.

W zasadzie mógł sprawdzić poprawność tego rozumowania, zaczynając próby od niewielkiego kąta nachylenia - unosząc koniec dwumetrowej deski na wysokość paru centymetrów - i powtarzając pomiar przy stopniowo zwiększonym kącie tak długo, aż prędkość kuli stanie się zbyt duża, by mógł ją zmierzyć. W ten sposób upewniłby się, że może uogólniać swoje wnioski na ruch po szczególnej równi, czyli na pionowy spadek swobodny.

Potrzebował także czegoś, co pomogłoby mu odmierzać czas toczenia się kul. Wyprawa do pobliskiego centrum handlowego w celu nabycia stopera skończyła się fiaskiem; ten wynalazek miał się pojawić dopiero za trzysta lat. Jednak w tym miejscu okazał się przydatny trening, jaki odebrał od ojca. Pamiętajmy, że Vincenzo wyćwiczył słuch Galileusza. Na przykład takt marsza wybijany jest co pół sekundy. Sprawny muzyk potrafi usłyszeć odchylenia od tego rytmu o wielkość sięgającą 1/64 sekundy.

Galileusz zagubiony w krainie pozbawionej czasomierzy postanowił zrobić z pochylni swego rodzaju instrument muzyczny. W poprzek deski naciągnął kilka strun lutniowych. Teraz toczące się w dół kulki trącały je. Następnie Galileusz przesuwiał każdą ze strun w górę i w dół tak długo, aż uznał, że staczająca się po równi kula odmierza równy rytm. Gdy wreszcie struny były rozmieszczone prawidłowo, nuciąc sobie marsza na „raz” wypuszczał kulę, która wybijała doskonały rytm, uderzając kolejne struny co pół sekundy. Galileusz zmierzył odległości między nimi i - *mirabile dictu!* - okazało się, że rosły one zgodnie z postępowaniem geometrycznym. Innymi słowy, odległość między punktem startu a drugą struną była cztery razy większa niż między punktem startu a pierwszą struną. Odległość dzieląca trzecią strunę od punktu startu była dziewięciokrotnie większa niż odcinek wyznaczony przez pierwszą strunę, czwarta natomiast była w odległości równej szesnastu odcinkom początkowym i tak dalej. A mimo to czas, jakiego kula potrzebowała na przebycie każdego z nich, wynosił zawsze pół sekundy. (Stosunek tych liczb: 1 do 4 do 9 do 16 można także wyrazić w postaci kwadratów kolejnych liczb naturalnych: 1^2 do 2^2 do 3^2 do 4^2 itd.).

Ale co się stanie, jeśli unosząc nieco koniec deski sprawimy, że pochylnia będzie bardziej stroma? Galileusz wypróbował wiele kątów nachylenia: od łagodnego, przez dosyć stromy, aż do takiego, przy którym ruch był tak szybki, że jego „zegar” nie mógł już precyzyjnie odmierzać odległości. Za każdym razem stwierdzał tę samą zależność, tę samą sekwencję kwadratów kolejnych liczb naturalnych. Najważniejszą rzeczą w tym odkryciu było wykazanie, że spadające ciało nie tylko zwyczajnie sobie leci, ale robi to coraz szybciej i szybciej. Przyspiesza, a przyspieszenie to jest stałe.

Ponieważ Galileusz był matematykiem, znalazł wzór służący do opisu tego ruchu. Odległość s , jaką przebywa spadające ciało, równa jest liczbie A pomnożonej przez podniesiony do kwadratu czas t , potrzebny ciału na przebycie tej drogi. W starożytnym

języku algebry można powyższe zdanie streścić następująco: $s = At^2$. Dla każdego kąta nachylenia deski współczynnik A ma inną wartość. A reprezentuje tu pojęcie przyspieszenia, to znaczy wzrastania prędkości ciała w miarę spadania. Galileusz wydedukował, że prędkość zmienia się w zależności od czasu w prostszy sposób niż odległość, wzrastając tylko proporcjonalnie do czasu, a nie do jego kwadratu.

Wykorzystanie nachylonej płaszczyzny, wyczulony słuch, pozwalający odmierzać czas z dokładnością do 1/64 sekundy, i zdolność mierzenia odległości z dokładnością do 0,2 cm złożyły się na to, że Galileuszowi udało się dokonać pomiarów z odpowiednią dokładnością. Później wynalazł zegar wykorzystujący regularny ruch wahadła. Dziś w Biurze Miar i Wąg cezowy zegar atomowy odmierza czas z dokładnością większą niż jedna milionowa sekundy na rok! A tym zegarom dorównują precyzją naturalne czasomierze: pulsary - wirujące gwiazdy neutronowe, które omiatają Wszechświat wiązką fal radiowych z niedoścignioną regularnością. Możliwe, że wysyłany przez nie sygnał jest nawet bardziej precyzyjny niż atomowe drgania cezu. Galileusz byłby zachwycony tak głęboką więzią łączącą astronomię z atomizmem.

Ale jakie znaczenie ma: $s = At^2$?

O ile wiemy, jest to pierwszy przypadek poprawnego opisanie ruchu w języku matematyki. Podstawowe pojęcia przyspieszenia i prędkości zostały wyraźnie zdefiniowane. Fizyka jest dziedziną, która zajmuje się badaniem materii i ruchu. Tory pocisków, ruchy atomów, wirowanie planet i wędrówki komet - wszystkie te rodzaje ruchu muszą być dokładnie opisane ilościowo. Obliczenia Galileusza, potwierdzone eksperymentalnie, stanowiły punkt wyjścia dla takiego opisu.

Aby to wszystko nie wydało się zbyt proste, musimy tu zaznaczyć, że Galileusz zajmował się badaniami ruchu przez dziesiątki lat, a w jednej z jego publikacji prawo to było błędnie sformułowane. Większość z nas, będących w gruncie rzeczy arystotelikami (czy wiedziałeś, drogi Czytelniku, że w gruncie rzeczy jesteś arystotelikiem?), mogłoby przypuszczać, że szybkość spadania zależy od ciężaru ciała. Galileusz, ponieważ był bystry, rozumował odmiennie. Ale czy rzeczywiście jest to takie dziwne, że uważamy, iż ciężkie rzeczy powinny spadać szybciej niż lekkie? Myślmy tak, bo sama przyroda wprowadza nas w błąd. Galileusz musiał przeprowadzić starannie przygotowane eksperymenty, by wykazać, że pozorna zależność czasu spadania od ciężaru ciała spowodowana jest tarciem między kulą a powierzchnią, po której się ona stacza. Wciąż więc polerował i polerował, by zmniejszyć efekty tarcia.

Piórko i grosik

Niełatwo jest wyłuskać proste prawo fizyki ze zbioru wyników pomiarów. Przyroda skrywa swą prostotę w gąszczu komplikujących sprawę okoliczności, a zadanie eksperymentatora polega na ich usunięciu. Prawo swobodnego spadania jest tego wspaniałym przykładem. Podczas wykładu dla studentów pierwszego roku umieszczamy piórko i grosik u szczytu szklanej rurki i jednocześnie je puszczamy. Grosz stuka o dno w czasie krótszym niż sekunda. Piórko delikatnie sphywa w dół i osiąga dno po 5-6 sekundach. Takie obserwacje doprowadziły Arystotelesa do sformułowania prawa, mówiącego, że ciała ciężkie spadają szybciej niż lekkie. Następnie wypompowujemy z rurki powietrze i powtarzamy eksperyment. Piórko i grosik spadają jednocześnie. Opór powietrza zniekształca prawo swobodnego spadania. By posuwać się naprzód i dotrzeć

do prostego prawa, musimy usuwać rzeczy, które komplikują obraz. Później, jeśli mamy ku temu ważne powody, możemy nauczyć się dodawać z powrotem ten efekt, by otrzymać bardziej złożone i mające szersze zastosowanie prawo fizyczne.

Arystotelicy uważali, że „naturalnym” stanem ciał fizycznych jest spoczynek. Pchnij kulę leżącą na płaszczyźnie: w końcu się zatrzyma, czyż nie? Galileusz wiedział wiele o wpływie niedoskonałych warunków i ta wiedza doprowadziła go do jednego z wielkich odkryć. Podobnie jak Michał Anioł, który widział wspaniałe postacie ukryte w marmurowych bryłach, Galileusz odczytywał fizykę zapisaną w równiach pochyłych. Zdawał sobie sprawę, że z powodu tarcia, ciśnienia atmosferycznego i innych nie sprzyjających okoliczności jego pochylnie nie były idealnymi narzędziami do badania sił oddziałujących na rozmaite ciała. Co by było - zastanawiał się - gdybym miał idealną pochylnię? Demokryt ostrzył w myśli swój nóż; podobnie trzeba w myśli polerować płaszczyznę tak długo, aż osiągnie najwyższą gładkość i zupełnie pozbędziemy się tarcia. Następnie należy umieścić płaszczyznę w komorze próżniowej, by wyeliminować opór powietrza, powiększyć ją do nieskończoności i upewnić się, że leży absolutnie poziomo. Teraz trzeba pchnąć doskonale wypolerowaną kulę leżącą na tej gładkiej, gładziuteńkiej powierzchni. Jak daleko się potoczy? Jak długo będzie się poruszać? (Dopóki to wszystko dzieje się w myśli, eksperyment jest możliwy do przeprowadzenia i tani).

Odpowiedź brzmi: bez końca. Galileusz rozumował następująco: gdy płaszczyzna - nawet zwykła, ziemską, niedoskonałą płaszczyzna - jest przechylona, kulka pchnięta pod górę toczy się coraz wolniej. Natomiast kulka pchnięta w dół toczy się coraz szybciej. Dlatego, na podstawie intuicyjnego poczucia ciągłości zachowania, stwierdził, że na płaskiej płaszczyźnie kulka nie będzie ani zwalniać, ani przyspieszać, tylko poruszać się bez końca. Galileusz dokonał intuicyjnego przeskoku do tego, co zwiemy teraz pierwszym prawem ruchu Newtona: poruszające się ciało pozostaje w ruchu. Siły są potrzebne nie po to, aby spowodować ruch, ale aby wywołać jego zmianę. W przeciwieństwie do arystotelesowskiego ujęcia, naturalnym stanem ciała jest ruch ze stałą prędkością. Stan spoczynku to tylko szczególny przypadek ruchu z zerową prędkością, ale wedle tego nowego ujęcia nie jest bardziej naturalny niż ruch z jakąkolwiek inną stałą prędkością. Dla każdego, kto kiedykolwiek prowadził samochód czy rydwan, idea ta przeczy doświadczeniu. Jeśli zdejmie się nogę z pedału gazu albo przestanie okładać konie, pojazd wkrótce się zatrzyma. Galileusz zauważył, że aby znaleźć prawdę, trzeba w myśli przypisać przyrządowi idealne własności (albo prowadzić samochód na oblodzonej drodze). Jego geniusz przejawiał się w tym, że umiał usunąć naturalne przeszkody, takie jak tarcie i opór powietrza, i określić zestaw fundamentalnych relacji zachodzących w świecie.

Jak się wkrótce przekonamy, Boska Cząstka stanowi komplikację narzuconą prostemu i pięknemu Wszechświatowi, być może po to, by ukryć tę olśniewającą symetrię przed oczami niegodnej, jak dotąd, ludzkości.

Prawda o wieży

Najstynniejszym przykładem, ilustrującym zdolność Galileusza do odsłaniania prostoty ukrytej pod warstwą komplikacji, jest historyjka o eksperymencie na krzywej wieży. Wielu ekspertów wątpi, by kiedykolwiek do niego doszło. Stephen Hawking na przykład pisze, że historia ta jest „prawie na pewno nieprawdziwa”. Dlaczego, pyta Hawking, Gali-

leusz miałby zawracać sobie głowę zrzucając ciężarków z wieży, nie dysponując nawet dokładną metodą mierzenia czasu ich spadania, podczas gdy miał już dobrze opracowane metody postępowania z równią pochyłą? Na cienie Greków! Hawking, teoretyk, używa tu Czystego Rozumu. Ale rozumowanie to zupełnie nie pasuje do takiego faceta, jakim był Galileusz, eksperymentator z zamiłowania.

Stillman Drake, biograf Galileusza, uważa, że anegdota z krzywą wieżą jest prawdziwa z kilku historycznie uzasadnionych powodów, ale także dlatego, iż doskonale pasuje do osobowości naszego bohatera. Eksperyment na wieży tak naprawdę nie był wcale eksperymentem, ale pokazem zaaranżowanym dla potrzeb publiczności i jednocześnie pierwszą w historii naukową sztuką wykonaną dla zyskania rozgłosu. Galileusz się popisywał, a jednocześnie demaskował swych krytyków. Był on raczej krewkim człowiekiem - może nie tyle kłótlwym, ile porywczym i zawziętym, zwłaszcza gdy ktoś mu rzucił wyzwanie. Kiedy go coś zirytowało, a irytowały go wszelkie przejawy głupoty, potrafił być naprawdę uciążliwy. Nie przywiązywał wagi do zewnętrznych form zachowania - wyśmiewał uroczyste stroje doktorskie wymagane na Uniwersytecie w Pizie. Napisał satyryczny wiersz zatytułowany *Przeciw todze*. Szczególnie spodobał się on młodszemu i biedniejszemu wykładowcom, którzy z ledwością mogli sobie na takie szaty pozwolić. (Demokrytowi, który kocha togi, wiersz zupełnie nie przypadł do gustu). Starsi profesorowie zaś zupełnie nie docenili dowcipu Galileusza. Pisywał także rozmaite dzieła, w których atakował rywali, podpisując się przy tym różnymi pseudonimami. Jego styl był wszakże charakterystyczny i niewielu zdołał wyprowadzić w pole. Nic więc dziwnego, że miał wrogów.

Najbardziej zaciekłymi rywalami Galileusza byli arystotelicy, którzy wierzyli, że ciało porusza się tylko wtedy, gdy działa na nie siła, i że ciężkie ciało spada szybciej niż lekkie, gdyż Ziemia przyciąga je z większą siłą. Nigdy nie przyszło im do głowy, by poddać te poglądy jakimś sprawdzianom. Wyznawcy doktryny Arystotelesa w zasadzie władali Uniwersytetem w Pizie, a jeśli już o tym mowa, to w gruncie rzeczy większością uniwersytetów włoskich. Jak łatwo się domyślić, Galileusz nie był ich ulubieńcem.

Impreza przy krzywej wieży była skierowana właśnie przeciw tej grupie. Hawking miał rację, że nie mogło być tu mowy o idealnym eksperymencie. Ale zapowiadała się wspaniała zabawa i - jak w każdym inscenizowanym wydarzeniu - Galileusz wiedział z góry, jaki będzie jej przebieg. Oczyma duszy widzę go, jak w całkowitej ciemności, gdzieś o trzeciej nad ranem, wspina się na szczyt wieży. Jak zrzuca parę ołowianych ciężarków na stojących u podnóża wieży młodych asystentów i woła przez okno: „Powinieneś jednocześnie poczuć uderzenie obu kul. Wrzaśnij, jeśli najpierw uderzy cię duża”. Ale tak naprawdę wcale nie musiał tego robić, bo drogą rozumowania doszedł do wniosku, że obie kule powinny uderzyć w ziemię w tym samym momencie.

Oto jak przebiegało to rozumowanie: załóżmy, że Arystoteles miał rację. Ciężka kula wylądzuje pierwsza, co oznacza, że porusza się z większym przyspieszeniem. Przywiążmy teraz lekką kulę do ciężkiej. Jeśli lekka kula rzeczywiście spada wolniej, powinna spowolnić ruch ciężkiej kuli, sprawiając, że teraz będzie dłużej leciała. Jednak, wiążąc te dwie kule, razem stworzyliśmy obiekt jeszcze cięższy, zatem ta kombinacja powinna spadać szybciej niż każda kula z osobna. Jak rozwiązać ten dylemat? Tylko jedno rozwiązanie spełnia wszystkie warunki: obie kule muszą spadać z jednakową prędkością. To jest jedyna konkluzja, która pozwala ominąć ów paradoks „wolniej czy szybciej”.

Zgodnie z legendą, Galileusz spędził cały poranek, spuszczać z wieży ołowiane kulki i przekonując o swej racji wszystkich zainteresowanych obserwatorów, a porządnie strasząc wszystkich innych. Był na tyle roztropny, by nie używać piórka i grosika, lecz ciał o różnym ciężarze, ale o jednakowym kształcie (na przykład drewniana kula i wydrążona ołowiana kula o takich samych średnicach), tak aby napotykały jednakowy opór powietrza. Reszta jest już historią, a w każdym razie powinna. Galileusz wykazał, że prędkość swobodnego spadania zupełnie nie zależy od masy spadającego ciała. (Nie wiedział, co prawda, dlaczego tak jest; dopiero Einstein zdołał to zrozumieć w 1905 roku). Arystotelicy odebrali lekcję, której nigdy mu nie zapomnieli ani nie wybaczyli.

Czy mamy tu do czynienia z nauką czy z showbiznesem? Po trosze z jednym i drugim. Zresztą nie tylko eksperymetatorzy wykazują podobne inklinacje. Richard Feynman, wielki teoretyk (ale on zawsze namiętnie interesował się eksperymentem), znalazł się w samym centrum publicznego zainteresowania, gdy był jednym z członków komisji badającej przyczyny katastrofy promu kosmicznego Challenger. Rozgorzała wtedy dyskusja wokół tego, czy zastosowane w budowie promu uszczelki o kołowym przekroju zachowują swoje własności w niskich temperaturach. Feynman zakończył tę dysputę jednym prostym gestem: gdy wszystkie kamery były na niego skierowane, wrzucił kawałek uszczelki do stojącej przed nim szklanki z wodą i lodem i pozwolił wszystkim naocznie się przekonać, co się dzieje z uszczelką. Czy nie należy przypuszczać, że Feynman, podobnie jak Galileusz, z góry wiedział, jaki będzie wynik eksperymentu?

W obecnej dekadzie Galileuszowy eksperyment na wieży wyłonił się z mroków historii w zupełnie nowym świetle. Chodzi o możliwość istnienia „piątej siły”, hipotetycznego dodatku do newtonowskiego prawa powszechnego ciężenia, który miałby spowodować niezmiernie małą różnicę w czasie spadania, dajmy na to, dwóch kul, miedzianej i ołowianej. Różnica ta przy locie z wieży o wysokości 30 metrów miałaby nie przekraczać miliardowej części sekundy. W czasach Galileusza byłby to niewyobrażalnie mały przedział czasowy, ale przy dzisiejszych możliwościach technicznych jego pomiar stanowi wprawdzie pewną trudność, jest jednak wykonalny. Na razie przesłanki świadczące o istnieniu „piątej siły”, które pojawiły się pod koniec lat osiemdziesiątych, prawie zupełnie zniknęły, ale nie przestawaj śledzić prasy, drogi Czytelniku, w każdej bowiem chwili mogą pojawić się najświeższe doniesienia na ten niezwykle interesujący temat.

Atomy Galileusza

Jakie Galileusz miał zdanie w sprawie atomów? Ukształtowany pod wpływem Archimidesa, Demokryta i Lukrecjusza, Galileusz intuicyjnie był atomistą. Przez kilkadziesiąt lat uczył i pisał o naturze materii i światła, w szczególności w książce *Il saggiaiore (Waga probiercza)* z 1622 roku i w swej ostatniej pracy, w wielkim *Dialogu o dwu najważniejszych układach świata*. Jak się zdaje, Galileusz uważał, że światło składa się z punktowych cząstek i że materia jest zbudowana podobnie.

Galileusz nazywał atomy najmniejszymi ilościami. Później wyobrażał sobie „niezliczoną liczbę atomów oddzielonych od siebie niezliczoną liczbą próżni”. Mechanistyczne poglądy są ściśle związane z rachunkiem nieskończenie małych liczb, prekursorem rachunku różniczkowego, który miał zostać wynaleziony dopiero 60 lat później przez

Newtona. Spotykamy tu wielkie bogactwo paradoksów. Weźmy zwykły stożek i wyobraźmy sobie, że równoległe do podstawy przecinamy go na dwie części. Przyjrzyjmy się otrzymanym krawędziom. Obie krawędzie są okręgami; skoro przedtem przylegały do siebie dokładnie punkt w punkt, to mają jednakowe promienie. A przecież stożek nieustannie zmniejsza się ku górze, więc nie mogą być jednakowe. Jeśli jednak każdy okrąg składa się z nieskończonej liczby atomów i pustych przestrzeni, można sobie wyobrazić, że górny okrąg zawiera mniejszą, choć wciąż nieskończoną liczbę atomów. Niemożliwe? Pamiętajmy, że jest rok 1630 i mamy do czynienia ze szczególnie abstrakcyjnymi ideami, które musiały czekać blisko 200 lat na rozstrzygnięcie za pomocą eksperymentu. (Jednym ze sposobów ominięcia tego paradoksu jest pytanie: Jaką grubość ma nóż, którego użyto do przekrojenia stożka? Zdaje się, że znowu słyszę chichot Demokryta).

W *Dialogu o dwu najważniejszych układach świata* Galileusz przedstawia swoje ostateczne refleksje nad strukturą atomu. W tym ujęciu, jak utrzymują niektórzy współcześni historycy nauki, atomy zredukowane są do matematycznych, abstrakcyjnych punktów, nie mają żadnych wymiarów, są ewidentnie niepodzielne, ale pozbawione kształtów, które przypisywał im Demokryt. W ten sposób Galileusz posunął ideę atomu o krok bliżej do jej najbardziej nowoczesnej wersji: punktowych kwarków i leptonów.

Akceleratory i teleskopy

Kwarki są jeszcze bardziej abstrakcyjne niż atomy i trudniej je sobie wyobrazić. Nikt nigdy nie widział żadnego z nich, jak więc mogą istnieć? Dysponujemy dowodami pośrednimi. Cząstki zderzają się w akceleratorach. Wyrafinowane urządzenia elektroniczne odbierają i przetwarzają sygnały elektryczne wytwarzane przez cząstki w licznych czujnikach detektora. Komputer interpretuje impulsy elektryczne pochodzące z detektora, redukując je do serii zer i jedynek. Te rezultaty przesyła nam na monitory znajdujące się w pomieszczeniu kontrolnym. Patrząc na reprezentację zer i jedynek, wołamy: „O kurczę blade, kwark!” To stwierdzenie wyda się laikowi niedostatecznie uzasadnione. Skąd mamy pewność, że akcelerator - albo detektor, albo komputer, albo przewód od komputera - nie mógł nam wyprodukować tego kwarka? W końcu nigdy nie widzieliśmy żadnego kwarka na własne, dane nam przez Boga oczy. Ach, gdzie te czasy, kiedy uprawianie nauki było prostsze! Czyż nie byłoby wspaniale znaleźć się z powrotem w XVI wieku? Czy rzeczywiście? Spytaj Galileusza.

Według informacji zostawionych nam przez Galileusza, zbudował on znaczną liczbę teleskopów. Swój własny wypróbował „sto tysięcy razy na stu tysiącach gwiazd i innych ciał”. Nabral do niego pełnego zaufania. Wyobrażam to sobie następująco: oto Galileusz w otoczeniu wszystkich swoich asystentów stoi przy oknie z teleskopem i opisuje, co widzi, a oni wszyscy notują jego słowa. „Widzę drzewo, ma gałąź skierowaną w tę stronę i liść w tamtą”. Po tym, jak opowie im, co widzi przez teleskop, wszyscy wsiadają na konie, a może w autobus, i jadą przez pole, by z bliska popatrzeć na drzewo. To, co widzą, porównują z opisem podanym im przez Galileusza. W ten właśnie sposób kalibruje się instrument; robi się to wiele, wiele razy. Pewien krytyk Galileusza opisuje drobiazgowy sposób testowania teleskopu i stwierdza: „Kiedy śledzę eksperymenty

dotyczące ziemskich obiektów, teleskop jest nadzwyczajny. Ufam mu, nawet jeśli staje między danymi nam przez Boga oczami a stworzonym przez Boga obiektem. Pomimo tego nie kłamie. Z drugiej strony, kiedy patrzę na niebo, widzę gwiazdę, choć gdy patrzę przez teleskop - widzę dwie gwiazdy. Zupełnie popaprane!”

No dobrze, przyznaję, że nie jest to dosłowny cytat, ale jeden z krytyków używał podobnych argumentów w dyspucie z Galileuszem, który twierdził, iż Jowisz ma cztery księżyce. Skoro teleskop pozwolił mu dostrzec więcej, niż można zobaczyć gołym okiem, to znaczy, że teleskop musi kłamać. Pewien profesor matematyki zbył Galileusza, mówiąc, że on także mógłby odkryć cztery księżyce wokół Jowisza, gdyby tylko miał dość czasu na „wbudowanie ich w jakieś szkła”.

Każdy, kto tylko używa jakiegoś przyrządu, napotyka ten sam problem. Czy przyrząd „fabrykuje” wyniki? Wypowiedzi krytyków Galileusza brzmią dzisiaj głupio, ale musimy się zastanowić, czy jego oponenti byli niepoczytalni, czy po prostu nieco konserwatywni. Niewątpliwie, po trosze jedno i drugie. W roku 1600 wierzono, że oko odgrywa aktywną rolę w procesie widzenia: oko dane nam przez Boga interpretuje dla nas świat widzialny. Dziś wiemy, że oko nie jest niczym więcej jak tylko wyposażoną w zespół receptorów soczewką, która przesyła informację do obszaru wzrokowego kory mózgowej i dopiero tam odbywa się prawdziwe „widzenie”. Oko pośredniczy między przedmiotem a mózgiem tak samo jak teleskop. Czy nosisz okulary, drogi Czytelniku? One też modyfikują odbierane przez ciebie dane zmysłowe. Gorliwi chrześcijańscy filozofowie z XVI wieku uważali, że korzystanie ze szkła to niemal świętokradztwo, choć znano je już od ponad 300 lat. Johannes Kepler stanowił chlubny wyjątek: mimo że był człowiekiem głęboko wierzącym, nosił szkła, bo dzięki nim lepiej widział. To była bardzo szczęśliwa decyzja, zważywszy, że podjął ją największy astronom swej epoki.

Przyjmijmy więc, że odpowiednio wykalibrowany przyrząd może dostarczyć danych będących dobrym przybliżeniem rzeczywistości. Zapewne tak dobrych, jak dostarczane przez najwspanialszy przyrząd - nasz mózg. Ale przecież nawet mózg od czasu do czasu wymaga kalibrowania i trzeba stosować system zabezpieczeń chroniących nas przed przekłamaniami oraz kompensować nieuniknione zniekształcenia. Na przykład, niezależnie od doskonale ostrego wzroku, kilka kieliszków wina może sprawić, że ujrysz wokół siebie podwójną liczbę przyjaciół.

Carl Sagan XVII wieku

Galileusz wydatnie przyczynił się do tego, że zaczęto akceptować stosowanie przyrządów w badaniach naukowych. Nie sposób przecenić znaczenia tego faktu dla nauk eksperymentalnych. Jakim był człowiekiem? Galileusz jawi się jako głęboki myśliciel o subtelnym umyśle, zdolny do intuicyjnego ujmowania zagadnienia (których to cech mógłby mu pozazdrościć niejeden dzisiejszy fizyk teoretyk), a jednocześnie jako pełen energii człowiek obdarzony techniczną żyłką i zdolnościami - na przykład do polerowania soczewek i konstruowania wielu przyrządów, takich jak teleskop, złożony mikroskop i zegar wahadłowy. Politycznie ewoluował od łagodnego konserwatyzmu do odważnych, ciętych ataków skierowanych przeciw oponentom. Musiał być tytanem pracy, nieustannie czymś zajęty, zostawił po sobie bogatą korespondencję i grube tomy opublikowanych prac. Był popularyzatorem: po wybuchu supernowej w 1604 roku wygłaszał wykłady przed wielkimi zgromadzeniami. Pisał potoczystą, gminną łaciną. Nikt z tamtej

epoki tak jak on nie przypomina Carla Sagana. Zapewne nie ostałby się na żadnym uniwersytecie, tak żywy był jego styl i uszczypliwy krytycyzm; w każdym razie, zanim został potępiony.

Czy Galileusz był doskonałym fizykiem? Tak doskonałym, jak tylko jest to możliwe. Łączył w sobie zarówno najwyższe umiejętności potrzebne eksperymentatorowi, jak i teoretykowi. Jeśli miał jakiegokolwiek braki, to w sferze teorii. Choć taka kombinacja cech była stosunkowo powszechna w XVIII i XIX wieku, to w obecnej epoce specjalizacji jest bardzo rzadko spotykana. W XVII wieku znaczna część tego, co można by nazwać teorią, była tak silnie związana z eksperymentem, że aż nie ma sensu próbować ich rozdzielać. Wkrótce przekonamy się, jak korzystnie jest, gdy po wielkim eksperymentatorze pojawia się wielki teoretyk. W rzeczy samej, już przed Galileuszem działała taka para uczonych.

Człowiek bez nosa

Cofnijmy się nieco w czasie, bo żadna książka poświęcona przyrządom i myśli, eksperymentowi i teorii, nie jest kompletna, jeśli nie wspomina się w niej o dwóch uczonych, których nazwiska wszystkim tak silnie kojarzą się ze sobą, jak Marks z Engelsem, Emerson z Thoreau czy Flip z Flapem. Mam na myśli Brahego i Keplera. Ściśle rzecz biorąc, byli astronomami, nie fizykami, ale należy im się krótka dygresja.

Tycho Brahe to jedna z dziwaczniejszych postaci w historii nauki. Ten szlachetnie urodzony w 1546 roku Duńczyk był niezrównanym mierniczym. W przeciwieństwie do fizyków atomowych, którzy spoglądają w dół, on patrzył ku niebiosom, a czynił to z niespotykaną precyzją. Brahe skonstruował rozmaite przyrządy do mierzenia położenia gwiazd, planet, komet i Księżyca. Działał na kilkadziesiąt lat przed wynalezieniem teleskopu, sam więc budował rozmaite urządzenia do pomiarów położenia ciał niebieskich - półkola i kwadranty azymutalne, mosiężne sekstansy, trójkąty paralaktyczne - za pomocą których razem z asystentem wyznaczał współrzędne gwiazd. Większość tych narzędzi to rozmaite odmiany dzisiejszego sekstansu; składały się z ruchomych ramion pozwalających na wyznaczanie dowolnego kąta. Astronomowie używali ich na podobieństwo strzelby, celując w gwiazdy przez coś w rodzaju celownika umieszczonego na końcach ramion przyrządu. Łuki łączące ramiona działały jak zwykły szkolny cyrkiel - pozwalały mierzyć kąt, pod jakim widoczna jest obserwowana gwiazda, planeta czy komet.

Brahe nie wniósł nic nowego do podstawowych zasad konstrukcji tych przyrządów, ale wzniosł na wyżyny sztukę ich budowania. Wypróbowywał rozmaite materiały, obmyślał, jak wykonać te nieporęczne urządzenia, aby można było łatwo je obracać w płaszczyznach pionowej i poziomej, a jednocześnie mieć pewność, że są solidnie umocowane, tak by można było śledzić ciała niebieskie każdej nocy z tego samego miejsca. Przede wszystkim zaś jego urządzenia były duże. Jak się przekonamy, gdy dojdziemy do omawiania czasów współczesnych, duże nie zawsze, choć zazwyczaj, jest lepsze. Najstłynniejszym przyrządem Tychona był kwadrant ścienny, którego promień miał blisko dwa metry - prawdziwy superakcelerator tamtych czasów. Kreski wyznaczające kolejne części stopni znajdowały się w tak dużej od siebie odległości, że Brahe mógł podzielić każdą minutę kątową na sześć dziesięciosekundowych części. Mówiąc prościej, błąd jego pomiarów nie przekraczał grubości igły trzymanej na odległość wyciągniętego ra-

mienia. I wszystko to osiągnął bez pomocy jakichkolwiek urządzeń optycznych. Pewne pojęcie o sile osobowości tego człowieka daje fakt, że we wnętrzu łuku kwadrantu kazał umieścić swój portret naturalnej wielkości.¹

Można by pomyśleć, że tego rodzaju wymagania świadczą o tym, iż Brahe był typem jajogłowego. Nic podobnego. Jego najbardziej niezwykłą cechą był nos, a raczej - jego brak. W czasie studiów, gdy miał 20 lat, Brahe wdał się w dziką kłótnię na temat jakiegoś zagadnienia matematycznego z innym studentem o nazwisku Manderup Parsbjerg. Kłótnia, która rozgorzała podczas przyjęcia w domu pewnego profesora, zakończyła się tym, że przyjaciele siłą musieli ich rozdzielać. (No dobrze, może był nieco jajogłowy, skoro wdawał się w bójki z powodu wzorów, a nie dziewczyn). Tydzień później spotkał się z rywalem na bożonarodzeniowym przyjęciu, wypili po kilka kielichów i od nowa podjęli matematyczną dysputę. Tym razem nie udało się ich rozdzielić. Przenieśli się na ciemny placyk przylegający do pobliskiego cmentarza i rzucili się na siebie z mieczami. Parsbjerg szybko zakończył pojedynek, odcinając Brahemu kawałek nosa.

Ta historia z nosem prześladowała Brahego do końca życia. Krążą dwie opowieści mówiące o tym, jak próbował tuszować swój defekt w czasach niedostatecznie rozwiniętej chirurgii plastycznej. Pierwsza, najprawdopodobniej apokryficzna, stwierdza, że kazał sobie wykonać cały zestaw nosów o różnych kształtach i z różnych materiałów. Ale wersja traktowana przez większość historyków jako prawdziwa jest równie dobra: Brahe zrobił sobie protezę ze złota i srebra do noszenia na stałe, umiejętnie pomalowaną i ukształtowaną, tak by wyglądała jak prawdziwy nos. Podobno zawsze miał ze sobą małe pudełeczko z klejem, którego używał, kiedy proteza się obluźowała. Nos Brahego stanowił niewyczerpane źródło żartów. Jeden z jego rywali mówił, że Brahe dokonuje swych obserwacji poprzez nos, używając go jako przeziernika.

Mimo tych trudności, miał pewną przewagę nad wieloma dzisiejszymi naukowcami: szlacheckie pochodzenie. Był zaprzyjaźniony z królem Fryderykiem II. Gdy obserwacje wybuchu supernowej w gwiazdozbiornie Kasjopei przyniosły Brahemu sławę, król podarował mu wyspę Hven, aby zbudował tam obserwatorium. Brahe zyskał także władzę nad mieszkańcami wyspy i prawo dysponowania wpłacanymi przez nich czynszami oraz dodatkowe fundusze od króla. Tym sposobem Tycho Brahe stał się pierwszym w świecie dyrektorem laboratorium. I co to był za dyrektor! Wiódł królewski żywot dzięki czynszom, dotacjom i własnej fortunie. Minęła go tylko niewątpliwa przyjemność zadawania się z dwudziestowiecznymi agencjami sponsorującymi badania naukowe.

Wyspa o powierzchni 800 hektarów stała się rajem astronoma. Były tam pracownie rzemieślników produkujących części do przyrządów, wiatrak, piarnia i prawie 60 stawów rybnych. Dla siebie Brahe zbudował wspaniały dom i obserwatorium w najwyższym punkcie wyspy. Nazwał je Uraniborgiem, czyli Zamkiem Uranii, i otoczył murami, w obrębie których znalazły się także: drukarnia, pomieszczenia dla służby, psiarnia dla psów obronnych oraz ogród z kwiatami i ziołami, a także około trzystu drzew.

Brahe w końcu opuścił wyspę w dość nieprzyjemnych okolicznościach, gdy jego dobroczyńca, król Fryderyk II, zmarł na skutek przedawkowania carlsberga czy innego napitku popularnego w Danii pod koniec XVI wieku. Lenna wyspa Hven powróciła do korony, a nowy król niebawem podarował ją niejakej Karen Andersdatter - kochance,

¹ Warto jednak pamiętać, że opisując ów instrument, Brahe stwierdził: „[...] malowidła, które są widoczne wewnątrz obwodu kwadrantu, zostały dodane wyłącznie w celach dekoracyjnych i po to, by przestrzeń w środku nie pozostawała pusta i bezużyteczna” (przyp. red.).

którą poznał w czasie przyjęcia. Niech to będzie nauką dla wszystkich dyrektorów, gdzie jest ich właściwe miejsce i jak łatwo panujący mogą ich zastąpić kimś innym. Na szczęście Brahe wyszedł z tego wszystkiego bez szwanku. Po prostu przeniósł swoje dane i przyrządy do zamku w pobliżu Pragi, gdzie mu pozwolono kontynuować prace.

Brahe zainteresował się przyrodą ze względu na regularność zjawisk obserwowanych we Wszechświecie. Gdy miał 14 lat, zafascynowało go całkowite zaćmienie Słońca, zapowiedziane na 21 sierpnia 1560 roku. Jak to się dzieje, że ludzie mogą zrozumieć ruchy gwiazd i planet tak dokładnie, iż potrafią przewidywać położenie gwiazd na wiele lat naprzód? Brahe pozostawił przebogata spuściznę: katalog pozycji 1000 (dokładnie tysiąca) gwiazd. Przewyższał on klasyczny katalog Ptolemeusza i pozwolił obalić wiele starych teorii.

Wielką zaletą techniki obserwacyjnej Brahego była uwaga, jaką poświęcał określaniu błędów pomiaru. Nalegał, i to było zupełnie niespotykane w owych czasach, by wielokrotnie powtarzać pomiary i by każdemu pomiarowi towarzyszyła ocena jego dokładności. Wyraźnie wyprzedzał swą epokę w dążeniu do przedstawiania danych razem z zastrzeżeniami co do stopnia ich pewności.

Jako obserwator i mierniczy, Brahe nie miał sobie równych. Jako teoretyk pozostawił wiele do życzenia. Urodzony w 3 lata po śmierci Kopernika, nigdy nie zaakceptował w pełni systemu heliocentrycznego, mówiącego, że to Ziemia krąży wokół Słońca, a nie na odwrót, jak twierdził Ptolemeusz wiele stuleci wcześniej. Obserwacje, które Brahe wykonał, przekonały go, że system ptolemejski był błędny, ale wykształcony w duchu arystotelesowskim, nie mógł się zdobyć na to, by przyznać, iż Ziemia się porusza i nie jest środkiem Wszechświata. Przecież, rozumował, gdyby Ziemia rzeczywiście się poruszała, to kula armatnia wystrzelona w kierunku zgodnym z jej ruchem powinna polecieć dalej niż kula wyrzucona w przeciwnym kierunku, a tak wcale nie jest. Poszedł zatem na kompromis: Ziemia pozostaje nieruchoma w centrum Wszechświata, ale - wbrew temu co twierdził Ptolemeusz - planety obiegają Słońce, które z kolei okrąża Ziemię.

Mistyka wyjaśnia

Brahe miał wielu znakomitych asystentów. Najbliższym z nich był matematyk i astronom o mistycznych skłonnościach - Johannes Kepler. Jako gorliwy luteranin urodzony w Niemczech, Kepler wolałby zostać duchownym, gdyż matematyka nie dawała zbyt wielkich możliwości zarobienia na życie. Niestety, nie zdał egzaminów wstępnych do seminarium i wylądował na uniwersytecie jako student astronomii i astrologii. Ale i tak pisany mu był los teoretyka, który miał wyłowić proste i doniosłe prawa ze stosów danych obserwacyjnych, zebranych przez Brahego.

Kepler, protestant żyjący w niefortunnym okresie szalejącej w Europie kontrreformacji, był delikatnym, neurotycznym, krótkowzrocznym człowiekiem, któremu brakowało pewności siebie Brahego czy Galileusza. Prawdę mówiąc, cała rodzina Keplerów składała się właściwie z dziwaków. Ojciec był najemnym żołnierzem, matkę sądzono jako czarownicę, a sam Johannes sporo czasu poświęcał astrologii. Na szczęście był w tym całkiem niezły i dzięki temu mógł nieco zarobić. W 1595 roku ułożył kalendarz dla miasta Graz, w którym przewidywał surową zimą, powstania chłopskie i najazdy tureckie. Wszystkie te przepowiednie niebawem się spełniły. Żeby oddać Keplerowi sprawiedliwość, trzeba przyznać, że nie był w tym procederze osamotniony. Galileusz układał

horoskopy dla Medyceuszów, Brahe też splamił się tym zajęciem, choć bez większego powodzenia: na podstawie zaćmienia Księżyca z 28 października 1566 roku przepowiedział śmierć sułtana Sulejmana Wspaniałego. Niestety, sułtan już wtedy nie żył.

Brahe źle traktował swego asystenta; bardziej jak stażystę, którym wprowadzie Kepler był, niż jak równorzędnego partnera, na co ten w pełni zasługiwał. Wrażliwy Johannes ugiął się pod brzemieniem zniewag. Rozstawali się w gniewie i godzili po wielokroć, jako że Brahe w końcu zaczął doceniać geniusz Keplera.

W październiku 1601 roku Brahe brał udział w przyjęciu i, swoim zwyczajem, wypił za dużo. Według ściśle obowiązującej etykiety, niestosowne było odchodzenie od stołu w czasie posiłku. Gdy wreszcie udało mu się wymknąć do łazienki, było już za późno: „coś istotnego” pękło mu w środku. Jedenaście dni później zmarł. Brahe już wcześniej mianował Keplera swym głównym asystentem. Na łożu śmierci powierzył mu wszystkie dane, zgromadzone w ciągu swej znakomitej i hojnie finansowanej kariery, i zaklinał go, by użył swych zdolności analitycznych do sporządzenia wielkiej syntezy, która wzbogaciłaby wiedzę o niebie. Nie zapomniał oczywiście dodać, że oczekuje, iż Kepler będzie się trzymał geocentrycznego systemu w jego wersji.

Kepler obiecał spełnić życzenie umierającego, niewątpliwie bez przekonania, bo uważał, że ów system był zupełnie zwariowany. Ale za to te dane! Dane nie miały sobie równych. Kepler ślęczał nad nimi w poszukiwaniu jakichś regularności w ruchach planet. Z miejsca odrzucił system Brahego i Ptolemeusza, bo były bardzo niezgrabne. Musiał jednak od czegoś zacząć. Sięgnął więc do systemu Kopernika, gdyż ze sferycznym układem orbit był najbardziej elegancką propozycją ze wszystkich dostępnych.

Idea centralnie położonego Słońca bardzo odpowiadała mistycznej stronie osobowości Keplera. Słońce nie tylko oświetlało wszystkie planety, ale było także źródłem siły - czy motywu, jak to wtedy określano - wywołującej ruch planet. Nie wiedział dokładnie, jak Słońce to robiło - przypuszczał, że w grę wchodziło coś w rodzaju magnetyzmu - ale swymi rozważaniami przygotował drogę dla Newtona. Był jednym z pierwszych uczonych odwołujących się do pojęcia siły jako czynnika niezbędnego dla pełnego zrozumienia budowy Układu Słonecznego. Stwierdził też, że system kopernikowski niezupełnie zgadzał się z danymi zebranymi przez Brahego. Zgryźliwy, stary Duńczyk dobrze wykształcił Keplera, wpajając mu zasady metody indukcyjnej: położyć fundament w postaci obserwacji i dopiero potem dochodzić przyczyn zjawisk. Pomimo skłonności mistycznych i fascynacji, a może nawet obsesji, geometryczną formą, Kepler wiernie trzymał się danych. Analiza danych zostawionych przez Brahego, zwłaszcza dotyczących Marsa, przyniosła w efekcie sformułowanie trzech praw ruchów planet. Obecnie, niemal czterysta lat później, prawa te wciąż jeszcze służą jako podstawa współczesnej astronomii planetarnej. Nie będę się tu zagłębiał w ich szczegóły, powiem tylko, że pierwsze prawo obaliło uroczą kopernikowską koncepcję kołowych orbit. Wyobrażenie takie królowało niepodważalnie od czasów Platona. Kepler dowiódł, że planety poruszają się po torach eliptycznych, przy czym Słońce leży w jednym z ognisk tych elips. Ekscentryczny luteranin uratował system kopernikowski i uwolnił go od niezręcznych epicykli wymyślonych przez Greków. Dokonał tego, pilnując, by teorie, które tworzył, były zgodne z obserwacjami Brahego co do minuty kątowej.

Elipsy! Czysta matematyka! A może w ten sposób przejawia się czysta przyroda? Jeśli, jak to odkrył Kepler, planety poruszają się po torach eliptycznych ze Słońcem znajdującym się w ognisku, oznacza to, że przyroda musi kochać matematykę. Coś, może Bóg, patrzy na Ziemię i mówi: „Lubię formy matematyczne”. Nietrudno jest wyka-

zać, że przyroda rzeczywiście ma do nich upodobanie. Podnieś kamień i rzuć go. Jego tor będzie dobrym przybliżeniem paraboli. Pod nieobecność powietrza otrzymałbyś doskonałą parabolę. Bóg nie tylko jest matematykiem, jest też dobry. Ukrywa złożoność, gdy umysł nasz nie potrafi jeszcze jej ogarnąć. Dziś na przykład już wiemy, że orbity nie są idealnymi elipsami z powodu wzajemnego przyciągania się planet, ale te odchylenia były o wiele za małe, by Brahe mógł je dostrzec za pomocą swego oprzyrządowania.

W dziełach Keplera jego geniusz często skrywa się za mistycznym bełkotem. Wierzył, że komety są złymi znakami, że Wszechświat podzielony jest na trzy obszary odpowiadające osobom Trójcy Świętej, że pływy morskie są wywoływane oddechem Ziemi, którą upodobnił do ogromnego żyjącego zwierzęcia. (Idea „Ziemi jako organizmu” została ostatnio wskrzeszona w postaci koncepcji Gai).

Ale i tak Kepler miał wielki umysł. Dostojny sir Arthur Eddington, jeden z najznakomitszych fizyków swej epoki, w 1931 roku nazwał Keplera „prekursorem współczesnej fizyki teoretycznej”. Eddington wychwalał Keplera za to, że wykazał się spojrzeniem podobnym do tego, jakie charakteryzuje teoretyków epoki kwantowej. Według Eddingtona, Kepler nie poszukiwał konkretnego mechanizmu wyjaśniającego budowę Układu Słonecznego, ale „kierowało nim wycucie matematycznej formy i instynkt estetyczny”.

Papież do Galileusza: spadaj

W 1597 roku, na długo przed ostatecznym rozpracowaniem pewnych kłopotliwych szczegółów, Kepler napisał list do Galileusza, w którym nakłaniał go do popierania systemu kopernikowskiego. Z typowym dla siebie religijnym zapalem przekonywał go, aby „uwierzył i otwarcie z tym wystąpił”. Galileusz odmówił porzucenia Ptolemeusza, potrzebował dowodów. Dostarczył mu ich teleskop.

Noce między 7 a 15 stycznia 1610 roku należy zapisać jako jedne z najważniejszych w historii astronomii. Wtedy właśnie za pomocą nowego i ulepszanego teleskopu własnej konstrukcji Galileusz dostrzegł cztery maleńkie „gwiazdy” poruszające się w pobliżu Jowisza i zmierzył tory ich ruchu. Zmuszony był przyznać, że ciała te krążą wokół planety. Ta konkluzja doprowadziła do nawrócenia Galileusza, sprawiła, że stał się wyznawcą systemu kopernikowskiego. Jeśli jakieś ciała mogą krążyć wokół Jowisza, to pogląd mówiący, że wszystkie planety i gwiazdy krążą wokół Ziemi, musi być błędny. Jak większość neofitów, czy to wyznawców idei naukowej, religijnej czy politycznej, Galileusz stał się zagorzałym i nieugiętym głosicielem astronomii kopernikowskiej. Historia przypisuje wielką zasługę Galileuszowi, ale my musimy także złożyć hołd teleskopowi, który stworzył niebiosom oczom uczonego.

Wielokrotnie już opowiadano długą i złożoną historię konfliktu Galileusza z władzami. Kościół skazał go na dożywotnie więzienie za jego poglądy w dziedzinie astronomii. (Później wyrok złagodniono, zamieniając go na stały areszt domowy). Dopiero w 1822 roku papież oficjalnie oznajmił, że Słońce może tkwić w centrum Układu Słonecznego. A w 1985 roku Watykan wreszcie przyznał, że Galileusz był wielkim uczonym i że Kościół wyrządził mu krzywdę.

Słoneczna gąbka

Galileusz popełnił także nieco inną, mniej znaną herezję, która jest nieco bliższa nurtowi naszej opowieści niż orbity Marsa i Jowisza. Podczas pierwszej naukowej wyprawy do Rzymu, w celu złożenia sprawozdania ze swych prac w dziedzinie optyki, Galileusz przywiózł ze sobą pudełeczko, które zawierało kawałki skały znalezione przez alchemików w pobliżu Bolonii. Skała ta świeciła w ciemności. Ten luminescencyjny minerał znany jest dziś jako siarczek baru, ale w roku 1611 alchemicy mieli dla niego znacznie bardziej poetycką nazwę: słoneczna gąbka.

Galileusz przywiózł ze sobą do Rzymu kawałki słonecznej gąbki, by z ich pomocą oddać się ulubionej rozrywce, a mianowicie irytować kolegów, wyznawców doktryny Arystotelesa. Sedno całej demonstracji nie uszło uwagi siedzących w mroku arystotelików: światło jest „czymś”. Galileusz wystawił kamień na słońce, a potem przeniósł go do ciemnego pokoju, przenosząc razem ze skałą światło. W ten sposób zadał kłam arystotelesowskiemu pogładowi, że światło jest po prostu własnością oświetlonego ośrodka i nie ma natury cząsteczkowej. Zdołał oddzielić światło od ośrodka i przemieszczał je wedle uznania. Dla katolika i arystotelika było to niemal równoznaczne z twierdzeniem, że można wziąć słodycz Najświętszej Pani i umieścić ją w ośle czy kamieniu. I z czego mianowicie ma się to światło składać? Z niewidocznych cząstek - rozumował Galileusz. Cząstek! Światło ma własności mechaniczne. Może być przenoszone, może uderzać w ciała, odbijać się od nich, przenikać je. Uznanie cząsteczkowej natury światła doprowadziło Galileusza do zaakceptowania idei niepodzielnych atomów. Nie wiedział, jak działa słoneczna gąbka, ale wyobrażał sobie, że być może pewne rodzaje skał mogą przyciągać świetliste cząstki tak, jak magnes przyciąga opiłki żelaza. Tak czy owak, tego rodzaju poglądy pogarszały tylko jego, już i tak bardzo niepewną, pozycję wśród ortodoksyjnych katolików.

Historyczna spuścizna Galileusza nierozzerwalnie łączy się z Kościołem i religią, ale on sam nigdy nie traktował siebie jako zawodowego heretyka ani też jako niewinnie cierpiącego świętego. Z naszego punktu widzenia był wielkim fizykiem. Jego wielkość znacznie wykracza poza zasługi związane z umocnieniem systemu kopernikowskiego. Przygotował grunt dla wielu nowych dziedzin wiedzy. Łączył eksperyment z rozumowaniem matematycznym. Gdy ciało się porusza, mówił, ważne jest, by ilościowo opisać jego ruch za pomocą równań matematycznych. Zawsze pytał: „Jak ciała się poruszają? Jak? Jak?” Nie pytał: „Dlaczego? Dlaczego ta kula spada?” Był świadom, że tylko opisuje ruch, co było zadaniem, jak na owe czasy, wystarczająco trudnym. Demokryt mógłby zażartować, że Galileusz chciał zostawić Newtonowi coś do zrobienia.

Zarządca mennicy

„Najłaskawszy Panie! Mam zostać zamordowany, choć może Pan sądzić, że nie; ale to prawda. Będzie to morderstwo najokropniejsze z możliwych. Dojdzie do niego w majestacie prawa, jeśli nie wybawi mnie od niego Pana miłosierna ręka”

Tak w 1698 roku pisał fałszerz William Chaloner - jedna z bardziej sprytnych i barwnych postaci w przestępczym światku Londynu tamtych czasów - do urzędnika,

który wreszcie zdołał go schwytać, osądzić i skazać. Chaloner zagrażał integralności brytyjskiej waluty, występującej wówczas głównie w postaci złotych i srebrnych monet.

Ten dramatyczny apel był skierowany do Isaaca Newtona, kuratora mennicy państwowej, który wkrótce miał zostać jej zarządcą. Newton skrupulatnie wykonywał swoje zadanie, które polegało na nadzorowaniu mennicy, kontrolowaniu przebijania monet i chronieniu waluty przed fałszerzami i „obcinaczami” - tymi, którzy zestrugiwali z monety cenny kruszec i puszczali ją z powrotem w obieg jako pełnowartościową. Ta posada - odpowiednik dzisiejszego sekretarza skarbu czy ministra finansów - łączyła w sobie udział w wyrafinowanej grze politycznej i walkach parlamentarnych ze ściganiem oszustów, rzezimieszków, złodziei i innych wyrzutków, którzy żerowali na walucie Królestwa. Korona powierzyła tę posadę wybitnemu uczonemu, Newtonowi, jako synekurę, aby mógł spokojnie pracować nad innymi, ważniejszymi zagadnieniami. Ale Newton potraktował ją zupełnie poważnie. Opracował technikę karbowania brzegu monet, by przechrzyć „obcinaczy”. Osobiście nadzorował wieszanie skazanych fałszerzy. Były to zajęcia nie mające nic wspólnego z majestatycznym spokojem wcześniejszych etapów życia Newtona, kiedy to jego prace nad zagadnieniami matematycznymi i przyrodniczymi dały początek gwałtownemu rozkwitowi tych nauk. Dopiero powstanie teorii względności na początku XX wieku można porównać z tym, czego dla rozwoju nauki dokonał Newton.

Kaprys historii sprawił, że Isaac Newton urodził się w Anglii w tym samym roku, w którym umarł Galileusz (1642). Nie sposób mówić o fizyce, nie wspominając Newtona. Był on uczonym o transcendentnym znaczeniu. Wpływ jego dokonań na dzieje ludzkości można porównać z wpływem Jezusa, Mahometa, Mojżesza i Gandhiego, a także Aleksandra Wielkiego, Napoleona i im podobnych. Newtonowskie prawo powszechnego ciążenia i stworzona przez niego metodologia zajmują po kilka rozdziałów w każdym podręczniku fizyki. Każdy, kto pragnie poświęcić się nauce lub inżynierii, musi je zrozumieć. Newtona określa się jako skromnego z powodu jego słynnego stwierdzenia: „Jeśli widziałem dalej niż inni, to dlatego, że stałem na ramionach gigantów”, co większość interpretuje jako złożenie hołdu takim uczonym, jak: Kopernik, Brahe, Kepler i Galileusz. Możliwa jest wszakże inna interpretacja: mówiąc te słowa, Newton naigrawał się ze swego zajadłego rywala naukowego, bardzo niskiego Roberta Hooke'a, który twierdził, nie bez racji, że to on pierwszy odkrył grawitację.

Naliczyłem ponad dwadzieścia poważnych biografii Newtona. A literatura, w której analizuje się, interpretuje i komentuje jego życie oraz osiągnięcia, jest nieprzebrana. W biografii napisanej przez Richarda Westfalla i opublikowanej w 1980 roku źródła, z których korzystał, podane są na dziesięciu gęsto zadrukowanych stronach. Westfall żywi dla Newtona bezgraniczny podziw:

„Miałem to szczęście, by przy różnych okazjach poznać wielu błyskotliwych ludzi, co do których bez wahania mogę przyznać, że intelektualnie mnie przewyższają. Nigdy też nie spotkałem nikogo, z kim nie chciałbym się porównywać; zawsze przecież można powiedzieć, że jestem w połowie, w jednej trzeciej czy w jednej czwartej tak zdolny jak ten, z kim się porównuję. Zawsze jednak ułamek był skończony. W rezultacie moich badań nad Newtonem doszedłem do przekonania, że z nim nie sposób się mierzyć. Stał się dla mnie osobą zupełnie innego rzędu, jednym z nielicznych geniuszy, którzy kształtowali kategorie ludzkiego intelektu”.

Historia atomizmu jest historią redukcjonizmu - wysiłków zmierzających do zredukowania całej przyrody do niewielkiej liczby praw rządzących niewielką liczbą pierwotnych obiektów. Największym redukcjonistą ze wszystkich był Isaac Newton. Musiało

minąć 250 lat, zanim wśród rzesz *Homo sapiens* zaludniających Ziemię pojawił się ktoś, kto mu dorównał. Wydarzyło się to w niemieckim mieście Ulm w roku 1879.

Siła niech będzie z nami

Chcąc dowiedzieć się czegokolwiek o fizyce, trzeba studiować Newtona. Ale trening, jakiemu poddani są studenci podczas wykładów, zbyt często przesłania całą potęgę i rozmach stworzonej przez niego syntezy. Newton opracował ilościowy, a przy tym wyczerpujący opis zachowania ciał fizycznych. Jego legendarne skojarzenie spadającego jabłka z ruchem Księżyca podkreśla zachwycającą moc matematycznego rozumowania. Sposób, w jaki jabłko spada na Ziemię i w jaki Księżyc ją okrąża, zawarty jest w jednej wszechogarniającej koncepcji. Newton pisał: „Pragnąłbym, byśmy mogli pozostałe zjawiska przyrody wyprowadzić z zasad mechaniki za pomocą podobnego rozumowania, ponieważ mam wiele powodów, by przypuszczać, że wszystkie one mogą zależeć od pewnych sił”.

Za czasów Newtona wiadano, jak poruszają się ciała fizyczne, znano trajektorię rzuconego kamienia, regularne wychylenia wahadła, ruch ciała zsuwającego się po równi pochyłej, warunki stabilności budowli, kształt kropli wody. Newton zaś uporządkował te wszystkie zjawiska, i wiele innych, tworząc z nich jednolity system. Stwierdził, że wszelkie zmiany ruchu powodowane są przez siłę i że reakcja ciała na działającą nań siłę zależy od własności tego ciała, zwanej masą. Każdy uczeń wie, że Newton sformułował trzy prawa ruchu. Jego pierwsze prawo to po prostu nowa wersja dokonanej przez Galileusza odkrycia, że stały, niezmienny ruch nie wymaga działania żadnej siły. Ale szczególnie interesuje nas teraz drugie prawo. Dotyczy ono siły, lecz jest nieodłącznie związane z jedną z tajemnic naszej powieści detektywistycznej - z masą. Prawo to opisuje, w jaki sposób siła wpływa na ruch.

Wielu autorów podręczników zmagало się z definicjami i logiczną spójnością drugiego prawa Newtona, które zapisujemy w takiej oto postaci: $F = ma$, co oznacza, że siła równa jest iloczynowi masy i przyspieszenia. W równaniu tym Newton nie definiuje ani siły, ani masy i dlatego nie jest zupełnie jasne, czy ten wzór stanowi definicję, czy wyraża prawo przyrody. Niemniej gdy się przebrnie jakoś przez tę trudność, dociera się do najbardziej użytecznego prawa fizyki, jakie kiedykolwiek zapisano. To proste równanie ma przeogromną moc i choć wygląda niewinnie, rozwiązanie go może sprawiać wielkie kłopoty. Błee... Znowu matematyka. Proszę się nie denerwować, nie będziemy niczego rozwiązywać, tylko o tym porozmawiamy. Zresztą ten niewielki wzór stanowi klucz do zrozumienia świata mechaniki, mamy więc powody, by się przy nim na chwilę zatrzymać. (Będziemy mieli do czynienia z dwoma newtonowskimi wzorami, dla wygody więc ten nazwijmy wzorem I).

Co to jest a ? To jest ta sama wielkość - przyspieszenie - którą Galileusz zdefiniował i zmierzył w Pizie oraz Padwie. Może to być przyspieszenie dowolnego obiektu: kamienia, wahadła, pocisku, a nawet statku kosmicznego *Apollo*. Jeśli nie nałożymy żadnych ograniczeń na zakres, którego ma dotyczyć nasze małe równanko, to a może reprezentować ruch planet, gwiazd czy elektronu. Przyspieszenie to tempo zmian prędkości. Pedał gazu w samochodzie jest tą częścią, która pozwala na zmianę wartości a . Jeśli jedziesz, drogi Czytelniku, samochodem i w ciągu pięciu minut jego prędkość wzrosła z 15 km/h do 60 km/h, to znaczy że poruszasz się z pewnym przyspieszeniem. Jeśli na-

tomiast od zera dochodzisz do 90 km/h w ciągu dziesięciu sekund, to znaczy że osiągnąłeś znacznie większe przyspieszenie.

Co to jest m ? Bez namysłu można powiedzieć, że m to własność materii. Jej miarą jest reakcja ciała na działającą na nie siłę. Im większe m , tym słabsza reakcja (a) na działającą siłę. Własność ta często bywa nazywana bezwładnością, a pełna jej nazwa to: „masa bezwładna”. Galileusz odwoływał się do bezwładności przy próbach wyjaśnienia, dlaczego poruszające się ciało „wykazuje tendencję do pozostawania w ruchu”. Z pewnością możemy za pomocą tego równania określać wielkość masy. Przyłóżmy taką samą siłę (później dojdziemy do tego, czym jest siła) do kilku ciał i posługując się zegarem oraz taśmą mierniczą zmierzmy ruch wywołany przez tę siłę, czyli wielkość a . Ciała o różnej masie m będą się poruszały z różnym a . Możemy przeprowadzić wiele takich eksperymentów, porównując masy wielu ciał. Gdy już się z tym uporamy, możemy sporządzić standardowy obiekt starannie wykonany z trwałego metalu i wybić na nim: 1,000 kg (to będzie nasza jednostka masy). Teraz wystarczy go umieścić w podziemiach Biur Miar i Wag w stolicach większych państw (światowy pokój bardzo by to ułatwił!). I tak mamy już opracowany sposób przypisywania liczbowej wartości masie dowolnego ciała. Będzie to po prostu wielokrotność lub ułamek naszego kilogramowego wzorca.

No dobrze, to będzie dosyć na temat masy, ale co z F ? Co to takiego F ? Newton nazywał je „naporem jednego ciała na drugie” - czynnikiem powodującym zmianę ruchu. Czy w naszym rozumowaniu nie zatoczyliśmy błędnego koła? Niewykluczone, ale nie martwmy się tym na razie. Możemy teraz za pomocą naszego prawa porównywać różne siły oddziałujące na standardowe ciało. Zbliżyliśmy się do bardzo interesującego zagadnienia. W przyrodzie istnieje wiele różnych sił. Pamiętajmy, że omawiane prawo jest prawdziwe dla dowolnego ich rodzaju. Obecnie znamy cztery rodzaje sił występujących w przyrodzie. Za czasów Newtona uczeni zaczęli poznawać jedną z nich - grawitację. Grawitacja sprawia, że ciała spadają, pociski mkną, a wahadła się wahają. Ziemia, przyciągająca wszystko, co się znajduje na jej powierzchni lub w jej pobliżu, wytwarza siłę, która jest źródłem wielkiej różnorodności możliwych rodzajów ruchów, a nawet braku ruchu.

Możemy między innymi zastosować wzór $F = ma$, by wyjaśnić strukturę stacjonarnych obiektów, takich jak na przykład Czytelniczka siedząca na krześle albo, by przykład uczynić bardziej pouczającym, stojąca na wadze łazienkowej. Ziemia przyciąga Czytelniczkę z pewną siłą. Krzesło lub waga pchają ją z siłą równą co do wartości, ale przeciwnie skierowaną. Suma obu sił działających na Czytelniczkę wynosi zero, dlatego też nie obserwujemy żadnego ruchu. (Wszystko to dzieje się już po tym, jak poszła do księgarni, aby kupić tę książkę). Waga mówi jej, jaka siła potrzebna jest dla zrównoważenia przyciągania grawitacyjnego: 60 kG lub, wśród ludów o niskiej kulturze, które nie stosują jeszcze układu metrycznego, 132 funty. „Olaboga, od jutra się odchudzam!” Tak właśnie siła grawitacji oddziałuje na Czytelniczkę. To jest właśnie to, co nazywamy ciężarem - po prostu przyciąganie grawitacyjne. Newton wiedział, że ciężar zmienia się nieco, gdy się jest w głębokiej dolinie lub na szczycie wysokiej góry, natomiast znacznie, gdy trafi się na Księżyc. Ale sama masa, czyli to, co przeciwstawia się sile, nie ulega zmianie.

Newton nie wiedział, że nacisk i popychanie, wywierane przez podłogi, krzesła, sprężyny, sznurki, wiatr i wodę, są ze swej natury siłami elektrycznymi. Pochodzenie siły nie ma znaczenia dla prawdziwości tego słynnego równania. Newton mógł analizo-

wać sprężyny, kije do krykieta, własności mechaniczne budowli, kształt kropli wody czy nawet samej Ziemi. Jeśli znamy siłę, możemy obliczyć parametry ruchu. Jeśli siła jest zerowa, zerowa jest także zmiana prędkości, co oznacza, że ciało kontynuuje swój ruch ze stałą prędkością. Jeśli podrzucisz, drogi Czytelniku, do góry piłkę, jej prędkość zmniejsza się, aż w najwyższym punkcie toru piłka się zatrzyma i zacznie spadać coraz szybciej. Sprawia to siła grawitacji, skierowana pionowo w dół. Rzuć piłkę przed siebie. Jak opisać ten wdzięczny łuk? Rozłóżmy ruch na dwie części - na składową pionową i poziomą. Na część poziomą nie oddziałują żadne siły (śludem Galileusza musimy pominąć opór powietrza, który jest minimalny). Dlatego pozioma część ruchu odbywa się ze stałą prędkością. Wzdłuż osi pionowej obserwujemy ruch w górę i w dół, aż do zepchnięcia się piłki z ziemią. Ruch złożony? Parabola! O rety! Kolejny dowód na to, że Bóg włada geometrią.

Założywszy, że znamy masę piłki i możemy określić jej przyspieszenie, wykorzystując $F = ma$ potrafimy dokładnie obliczyć parametry jej ruchu. Tor piłki jest zdeterminowany: jest nim parabola. Ale przecież jest wiele rodzajów parabol. Słabo uderzona piłka nie polecą daleko, mocne odbicie może posłać ją aż poza boisko. Skąd się biorą te różnice? Biorą się ze zmiennych, które Newton nazwał warunkami początkowymi. Jaka była początkowa prędkość? A początkowy kierunek? Może on przybierać rozmaite wartości, od pionowego w górę (w tym przypadku rzucający dostanie piłką w głowę) do prawie poziomego (kiedy piłka bardzo szybko spadnie na ziemię). W każdym przypadku tor ruchu, czyli trajektoria, jest zdeterminowany przez prędkość i kierunek w momencie rozpoczęcia ruchu - to znaczy przez warunki początkowe. Chwileczkę!!!

Dochodzimy tu do głęboko filozoficznego zagadnienia. Jeśli dany jest zespół warunków początkowych dotyczących określonej liczby ciał i jeśli znane są siły oddziałujące na te ciała, to można określić, jak będzie przebiegał ich ruch... wiecznie. W świecie Newtona wszystko jest przewidywalne i zdeterminowane. Załóżmy na przykład, że wszystko w świecie składa się z atomów - cóż za dziwaczna sugestia jak na ten przykład. Przypuśćmy, że znamy początkowy stan każdego z miliardów miliardów atomów i że wiemy, jakie siły na nie oddziałują. Załóżmy, że jakiś kosmiczny, supergigantyczny komputer mógłby przetrawić te dane i określić przyszłe położenia każdego atomu. Gdzie one wszystkie się znajdą w jakiejś chwili w przyszłości, powiedzmy w Dniu Zwycięstwa? Wynik byłby przewidywalny. Wśród tych miliardów atomów byłby mały podzbiór, który można by nazwać „Czytelnik”, „Leon Lederman” lub „Papież”. Przewidywalny, zdeterminowany... Wolny wybór byłby tylko iluzją samooszukującego się umysłu. Nauka stworzona przez Newtona była deterministyczna. Późniejsi filozofowie zredukowali rolę Stwórcy do „nakręcenia sprężyny świata” i puszczenia jej w ruch. Potem dzieje świata spokojnie już mogły się toczyć same. (Co rozsądniejsi uczeni zajmujący się tą problematyką w latach dziewięćdziesiątych XX wieku mogliby wysunąć co do tego pewne obiekcje).

Oddźwięk, jaki teorie Newtona wywołały w filozofii i religii, był tak samo głęboki, jak ich wpływ na fizykę. A wszystko to za przyczyną tego podstawowego równania: $\vec{F} = m\vec{a}$. Strzałki mają przypominać studentowi, że siły i ich konsekwencje - przyspieszenia - skierowane są w tę samą stronę. Mnóstwo wielkości fizycznych, takich jak masa, temperatura, objętość, nie jest skierowanych w żadnym kierunku. Ale „wektory” - czyli wielkości takie jak siła, prędkość czy przyspieszenie - oznaczamy strzałkami, bo są konkretnie zorientowane w przestrzeni.

Zanim zostawimy równanie „ Ef równa się ma ” w spokoju, poświęćmy jeszcze chwilę jego potędze. Stanowi ono podstawę inżynierii lądowej, wodnej, akustycznej i innych jeszcze jej typów. Używa się go, aby zrozumieć napięcie powierzchniowe, przepływ cieczy w rurach, dryf kontynentów, rozchodzenie się dźwięku w stali i w powietrzu, stabilność takich budowli, jak na przykład Sears Tower czy jednego z najpiękniejszych mostów, Bronx-Whitestone, o pełnych wdzięku łukach spinających brzegi zatoki Pelham. Gdy byłem małym chłopcem, jeździłem często rowerem z naszego domu przy Manor Avenue nad zatokę, gdzie przyglądałem się wznoszeniu tej wspaniałej konstrukcji. Inżynierowie, którzy ją zaprojektowali, byli dogłębnie zaznajomieni z równaniem Newtona. Teraz zaś, w miarę jak nasze komputery stają się coraz szybsze, rosną nasze możliwości rozwiązywania problemów za pomocą $F = ma$. Dobra robota, panie Newton!

Obiecywałem trzy prawa, a omówiłem tylko dwa. Trzecie prawo głosi, że „akcja równa jest reakcji”. Ściślej mówiąc, chodzi o to, że gdy ciało A wywiera jakąś siłę na ciało B, zawsze B wywiera na A taką samą siłę, tylko przeciwnie skierowaną. Istota tego prawa leży w tym, że dotyczy ono wszystkich sił: grawitacyjnych, elektrycznych, magnetycznych i innych, niezależnie od ich rodzaju.

Ulubione F Isaaca

Kolejne odkrycie o wielkim znaczeniu, którego dokonał Isaac N., związane było z pewną konkretną siłą. Chodzi o grawitację, którą on znalazł w przyrodzie. Pamiętajmy, że F z drugiego prawa Newtona oznacza po prostu jakąkolwiek siłę. Wybierając siłę, którą chcemy wstawić do równania, trzeba ją na wstępie określić ilościowo, by równanie miało sens. To oznacza - Boże dopomóż - kolejne równanie.

Newton sformułował wyrażenie prawdziwe dla F (grawitacji) - to jest dla tych przypadków, kiedy w grę wchodzi siła grawitacji - zwane prawem powszechnego ciężenia. Mówi ono o tym, że wszystkie ciała wywierają na siebie nawzajem oddziaływanie grawitacyjne. Siła tego oddziaływania zależy od odległości dzielącej ciała i od ich masy. Od masy? Chwileczkę! Tu właśnie przejawia się słabość, jaką Newton miał dla koncepcji atomowej budowy materii. Według niego, siła grawitacji działa na wszystkie atomy ciała, a nie tylko na te, które znajdują się w pobliżu jego powierzchni. Ziemia przyciąga jabłko jako całość - każdy atom Ziemi przyciąga każdy atom jabłka. Podobnie i jabłko przyciąga Ziemię. Mamy tu do czynienia z przerażającą symetrią, bo w takim razie Ziemia musi przysunąć się nieskończenie mały kawałek na spotkanie spadającego jabłka. Powszechność tego prawa polega na tym, że siła grawitacji działa wszędzie. Jest to siła, z jaką Ziemia przyciąga Księżyc, z jaką Słońce przyciąga Marsa, z jaką Słońce przyciąga Proximę Centauri - swojego najbliższego gwiazdnego sąsiada, odległego o 40 000 000 000 000 kilometrów. Krótko mówiąc, prawo to odnosi się do wszystkich ciał. Wszędzie. Oddziaływanie to sięga w przestrzeń i maleje wraz ze wzrostem odległości dzielącej dwa ciała. Uczniowie dowiadują się w szkołach, że jest to prawo odwrotnych kwadratów, co oznacza, że siła jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości. Gdy odległość dzieląca dwa ciała zwiększa się dwukrotnie, siła zmniejsza się czterokrotnie. Gdy odległość wzrośnie trzykrotnie, siła zmaleje do 1/9 pierwotnej wielkości, i tak dalej.

Co nas pcha do góry

Jak już wspomniałem, siła jest wielkością wektorową: na przykład siła grawitacji na powierzchni Ziemi skierowana jest w dół. Jaka jest natura siły, która jej przeciwdziała, która działa do góry? Czym jest siła wywierana przez krzesło na siedzącego, przez kij baseballowy na piłkę, przez gwóźdź na młotek, na czym polega nacisk helu rozciągającego balon, „ciśnienie” wody wypychającej do góry zanurzony w niej kawałek drewna? Dlaczego - co jest bardzo przygnębiające - większość z nas nie potrafi przenikać ścian? Zaskakująca, prawie szokująca odpowiedź jest taka, że wszystkie wymienione siły są różnymi przejawami oddziaływania elektrycznego.

Na początku ten pogląd wydaje się dziwny. W końcu, nie odczuwamy ładunków elektrycznych pchających nas do góry, gdy stajemy na wadze albo gdy siadamy na krześle. Siła ta działa pośrednio. Jak dowiedzieliśmy się od Demokryta (i z eksperymentów przeprowadzonych w XX wieku), materia w znacznej części składa się z pustej przestrzeni, a wszystko jest zbudowane z atomów. To, co spaja te atomy i pozwala wyjaśnić sztywność materii, jest oddziaływaniem elektrycznym. (Opór, jaki ciała stałe stawiają próbom przenikania przez nie, ma też coś wspólnego z teorią kwantową). Oddziaływanie to ma bardzo dużą moc: mała waga łazienkowa ma jej dość, by zrównoważyć przyciąganie całej Ziemi. Z drugiej strony, lepiej nie stawać na tafli jeziora ani wychodzić przez okno z mieszkania na dziesiątym piętrze. W wodzie, a szczególnie w powietrzu, atomy tkwią zbyt rzadko, by mogły zapewnić sztywność niezbędną dla zrównoważenia ciężaru człowieka.

W porównaniu z oddziaływaniem elektrycznym, które spaja materię i nadaje jej sztywność, grawitacja jest bardzo słaba. Jak słaba? Podczas moich wykładów przedstawiam zawsze następujące doświadczenie. Biorę kawałek drewna, powiedzmy listwę o długości 30 cm, i w połowie zaznaczam biegnącą dokoła niej linię. Unoszę listwę pionowo do góry, podpisuję górną część „góra”, a dolną część „dół”. Trzymając ją za górną część, pytam: „Dlaczego dolna część pozostaje na miejscu, mimo że cała Ziemia ciągnie ją do dołu?” Odpowiedź brzmi: „Bo jest mocno sczepiona z częścią górną za pośrednictwem sił elektrycznych, które spajają atomy składające się na drewno. A Lederman trzyma górną część”. Racja.

By zbadać, o ile potężniejsze od grawitacji (Ziemi przyciągającej „dół”) są siły elektryczne, które spajają górę z dołem, przepiłowuję listwę na pół wzdłuż zaznaczonej linii (zawsze chciałem być nauczycielem zajęć praktyczno-technicznych). W ten sposób za pomocą piły zredukowałem praktycznie do zera siły elektryczne wiążące „górną” z „dołem”. Teraz, na moment przed spadnięciem na podłogę, „dół” znalazł się w konfliktowej sytuacji: mimo że siły elektryczne zostały usunięte, „górną” wciąż jeszcze przyciąga grawitacyjnie „dół”. Ziemia z kolei wciąż ciągnie „dół” do dołu. Zgadnij, drogi Czytelniku, która z nich wygra. Dolna połowa listewki spada na podłogę. Za pomocą równania wyrażającego prawo powszechnego ciężenia możemy obliczyć różnicę między tymi dwiema siłami grawitacji. Okazuje się, że siła, z jaką Ziemia przyciąga „dół”, jest ponad miliard razy większa niż ta, z którą przyciąga go „górną”. (Proszę uwierzyć mi na słowo). Wniosek: siła elektryczna spajająca „górną” z „dołem” była przynajmniej miliard razy silniejsza niż przyciąganie grawitacyjne między tymi dwiema częściami. W sali wykładowej nie osiągniemy lepszego przybliżenia, ale okazuje się, że rzeczywiście jest ona 10^{41} (ta liczba to jeden z czterdziestoma i jeden zerami) razy silniejsza. Zapiszmy to w tej postaci:

100 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000.

Nie sposób uzmysłwić sobie ogromu tej liczby. Nie ma mowy. Ale może ten przykład choć trochę przybliży nam 10^{41} : Wyobraźmy sobie elektron i pozyton w odległości ćwierć milimetra od siebie. Obliczmy siłę grawitacji, z jaką się przyciągają. Teraz policzmy, jak daleko od siebie musiałyby się znaleźć te dwie cząstki, aby zrównała się z nią występująca między nimi siła przyciągania elektrycznego. Odpowiedź brzmi: około półtora tysiąca bilionów kilometrów (50 lat świetlnych). Oczywiście, wszystko to przy założeniu, że siła oddziaływania elektrycznego maleje z kwadratem odległości - tak samo jak siła grawitacji. Czy to pomogło? Grawitacja dominuje wśród wielu rodzajów ruchów, które badał Galileusz, ponieważ każda cząstka planety przyciąga ciała znajdujące się przy jej powierzchni. W badaniach nad atomami i jeszcze mniejszymi obiektami efekty grawitacji są zupełnie niedostrzegalne. W wielu innych zjawiskach grawitacja również jest bez znaczenia. Na przykład w zderzeniu dwóch kul bilardowych (fizycy uwielbiają zderzenia, są one doskonałym narzędziem pozwalającym na zdobywanie wiedzy) wpływ Ziemi zostaje zniwelowany, jeśli eksperyment odbywa się na stole. Działającą pionowo w dół siłę przyciągania ziemskiego równoważą skierowany pionowo w górę nacisk stołu. Pozostają więc tylko siły działające poziomo, gdy jedna kula uderza w drugą.

Tajemnica dwóch mas

Dzięki newtonowskiemu prawu powszechnego ciężenia można określić wartość F we wszystkich przypadkach, w których wchodzi w grę grawitacja. Wspominałem już, że Newton zapisał wzór na F w ten sposób, że siła oddziaływania jednego obiektu, powiedzmy Ziemi, na inny, powiedzmy Księżyc, zależy od ilości tworzywa grawitacyjnego zawartego w Ziemi pomnożonej przez ilość tworzywa grawitacyjnego zawartego w Księżycu. By wyrazić ilościowo tę doniosłą prawdę, Newton znalazł inny wzór, wokół którego od pewnego czasu krążymy. Wyrażony za pomocą słów przedstawia się on następująco: siła przyciągania grawitacyjnego między dwoma ciałami A i B równa jest pewnej stałej liczbowej (zazwyczaj oznaczanej literą G) pomnożonej przez iloczyn ilości tworzywa w A i ilości tworzywa w B oraz podzielonej przez kwadrat odległości między A i B. Symbolami wyraża się to tak:

$$F = G M_A \times M_B / R^2.$$

Nazwijmy to Wzorem II. Nawet zagorzały wróg wszelkich rachunków musi docenić prostotę tego równania. By je nieco przybliżyć, możemy przyjąć, że A to Ziemia, B zaś - Księżyc, choć w newtonowskim sformułowaniu równanie to odnosi się do wszystkich ciał. Równanie odnoszące się do tego konkretnego układu wygląda następująco:

$$F = G M_{Ziemi} \times M_{Księżyc} / R^2.$$

Odległość między Ziemią i Księżycem sięga 400 000 km. Stała G równa się $6,67 \times 10^{-11}$ w jednostkach, które mierzą masy w kilogramach, a odległości w metrach. Ta dokładnie znana wielkość stałej określa siłę oddziaływania grawitacyjnego. Nie musimy zapamiętywać wartości tej stałej ani w ogóle się nią przejmować. Zauważmy tylko, że 10^{-11} świadczy o tym, że jest to bardzo mała liczba. F nabiera jakiegokolwiek znaczenia tylko wtedy, gdy przynajmniej jedno z M jest ogromne, tak jak w przypadku Ziemi. Gdyby okrutny Stwórca mógł uczynić G równym zeru, życie zniknęłoby dość prędko, Ziemia poszybowałaby w przestrzeń w kierunku stycznym do jej dotychczasowego,

eliptycznego toru wokół Słońca i zdecydowanie nie groziłoby nam już globalne ocieplenie.

Bardzo ciekawą rzeczą jest masa M , którą nazywamy masą grawitacyjną. Mówiłem, że jest ona miarą tworzywa - w naszym przykładzie tworzywa Ziemi i Księżyca - które, zgodnie ze wzorem, wytwarza oddziaływanie grawitacyjne. „Chwileczkę - słyszę jęki dochodzące z tylnych rzędów - mamy teraz dwie masy. Masę m z $F = ma$ (Wzór I) i masę M w naszym nowym Wzorze II. No i co teraz?” Słuszna uwaga, ale to nie jest żadne nieszczęście, tylko wyzwanie.

Nazwijmy te dwa rodzaje masy dużym M i małym m . Duże M jest miarą materii grawitacyjnej, która przyciąga inne ciała. Małe m to masa bezwładna, to miara materii przeciwstawiającej się sile i determinującej wielkość ruchu będącego następstwem tej siły. Są to dwa całkowicie różne atrybuty materii. Newtonowi zawdzięczamy zrozumienie tego, że z eksperymentów Galileusza (pamiętasz, drogi Czytelniku, Pizie?) i wielu innych wynika wyraźnie, iż $M = m$. Tworzywo grawitacyjne jest równoważne masie bezwładnej występującej w drugim prawie ruchu Newtona.

Człowiek z dwoma umlautami

Newton nie wiedział, dlaczego te dwie wielkości są równe; po prostu przyjął ten fakt do wiadomości. Przeprowadził nawet kilka sprytnych eksperymentów, mających na celu sprawdzenie, czy rzeczywiście są równe. Z dokładnością do jednego procentu udało mu się udowodnić, że są. To znaczy $M/m = 1,00$. M podzielone przez m daje jeden z dwoma zerami po przecinku. Ponad dwieście lat po Isaacu Newtonie zdołano znacznie poprawić dokładność tego pomiaru. W latach 1888-1922 węgierski baron Roland Eötvös przeprowadził serię niezwykle zmyślnych eksperymentów, w których wykorzystał wahadła z aluminium, miedzi, drewna i różnych innych materiałów. Wykazał, że między tymi dwiema własnościami materii zachodzi równość z dokładnością do pięciu części na miliard. W języku matematyki wygląda to tak:

$M/m = 1,000\ 000\ 000 \pm 0,000\ 000\ 005$. Czyli stosunek ten zawiera się między 1,000 000 005 a 0,999 999 995.

Dziś potwierdziliśmy prawdziwość tej równości do ponad dwunastu miejsc po przecinku. Galileusz udowodnił w Pizie, że dwie różne kule spadają z taką samą prędkością. Newton wykazał, dlaczego tak się dzieje. Skoro duże M równa się małemu m , siła grawitacji jest proporcjonalna do masy obiektu. Masa grawitacyjna (M) kuli armatniej może być tysiąc razy większa niż masa kulki od łożyska, a zatem siła grawitacji, której doświadczy, będzie tysiąc razy większa. Ale też jej masa bezwładna (m) będzie wykazywać tysiąckrotnie większy opór wobec tej siły niż masa bezwładna małej kulki. Jeśli te dwa ciała spuści się z wieży, to wspomniane efekty zniosą się nawzajem: kula armatnia oraz kulka od łożyska jednocześnie spadną na powierzchnię Ziemi.

Równość M i m wydawała się być niewiarygodnym zbiegiem okoliczności i dręczyła fizyków przez stulecia. Stanowiła ona klasyczny odpowiednik liczby 137. W 1915 roku Einstein włączył ten zbieg okoliczności do swej wielkiej teorii, zwanej ogólną teorią względności.

Badania barona Eötvösa nad stosunkiem M do m były najpoważniejszym, ale bynajmniej nie jedynym jego wkładem w rozwój nauki. Był między innymi rekordzistą w dziedzinie pisowni: dwa umlauty! Co ważniejsze, Eötvös interesował się nauczaniem

przedmiotów przyrodniczych i kształceniem nauczycieli szkół średnich - mnie także te zagadnienia są bliskie i poświęcam im sporo czasu. Historycy odnotowali, że jego wysiłki doprowadziły do eksplozji geniuszu. Tacy luminarze fizyki, jak: Edward Teller, Eugene Wigner, Leo Szilard, czy matematyk John von Neumann, pochodzą z Budapesztu z epoki Eötvösa. To masowe pojawianie się na początku XX wieku na Węgrzech fizyków i matematyków doprowadziło pewnych, skądinąd rozsądnych, obserwatorów do uznania, że Marsjanie założyli bazę w Budapeszcie i stamtąd zamierzają podbić naszą planetę.

Loty kosmiczne są niezwykle dramatyczną ilustracją prac Newtona i Eötvösa. Wszyscy widzieliśmy filmy kręcone na pokładach statków kosmicznych. Astronauta wypuszcza długopis, który unosi się obok niego, z wdziękiem demonstrując nam stan nieważkości. Oczywiście, ani człowiek, ani długopis nie tracą tak naprawdę ciężaru; siła przyciągania grawitacyjnego wciąż działa. Ziemia przyciąga masę grawitacyjną statku, astronauty i długopisu. Jednocześnie ruch na orbicie zdeterminowany jest przez masy bezwładne tychże obiektów zgodnie ze Wzorem II. Skoro obie masy są równe, wszystkie ciała poruszają się jednakowo. Astronauta, długopis i statek poruszają się razem w nieważkim tańcu.

Tę samą sytuację można też ująć jako swobodne spadanie, bo tym właśnie jest tak naprawdę ruch statku kosmicznego na orbicie okołoziemskiej. Księżyc w pewnym sensie też nieustannie spada na Ziemię. Nigdy do niej nie dolatuje tylko dlatego, że sferyczna powierzchnia Ziemi oddala się od niego z tą samą prędkością, z którą on spada. Tak więc, jeśli nasz astronauta spada swobodnie i jego długopis też spada swobodnie, to są w takiej samej sytuacji jak dwa ciała spuszczone z krzywej wieży. W statku kosmicznym, podobnie jak podczas spadania z wieży, waga wskazywałaby zero (gdyby tylko astronauta udało się jakoś na niej stanąć). Stąd właśnie ten termin: „nie-ważkość”. Amerykańska agencja kosmiczna NASA wykorzystuje zjawisko swobodnego spadania podczas treningów przygotowawczych dla astronautów. Aby przyzwyczaić ich do stanu nieważkości, zabiera się ich na przejażdżkę samolotem odrzutowym, który lata na dużej wysokości po torze składającym się z serii parabol (znowu ta krzywa). Podczas pikowania pasażerowie doświadczają stanu nieważkości, nie bez pewnych nieprzyjemnych doznań, które mu zazwyczaj towarzyszą. Nieoficjalnie samolot ten nazywany jest wymiotną kometa.

Tak wyglądają problemy ery kosmicznej. Ale Newton wiedział wszystko o astronautach i jego długopisie. Już wtedy, w XVII wieku, mógłby Ci powiedzieć, drogi Czytelniku, co się będzie działo w statku kosmicznym.

Wielki twórca syntez

Newton wiódł na wprost pustelniczy tryb życia, częściowo w Cambridge, częściowo w majątku rodzinnym w Lincolnshire, podczas gdy Londyn był prawdziwym centrum, w którym działały wielkie umysły tamtej epoki. W latach 1684-1687 pracował nad swym głównym dziełem: *Philosophiae naturalis principia mathematica (Zasady matematyczne filozofii naturalnej)*. W nim zawarł podsumowanie wszystkich swoich badań w dziedzinie matematyki i mechaniki, które wcześniej pozostawały niekompletne czy niejasne. *Principia* stanowiły już kompletną symfonię, ujmującą wyniki dwudziestu lat pracy.

Pisząc to dzieło, Newton musiał przeprowadzić powtórne obliczenia, przemyśleć i przejrzeć stare oraz zebrać nowe dane: o drogach komet, o księżycach Jowisza i Saturna, o pływach u ujścia Tamizy i jeszcze wielu innych zjawiskach. To właśnie na kartach tego dzieła Newton wyraził ideę absolutnego czasu i przestrzeni, to tu sformułował w ścisły sposób trzy prawa ruchu. Tu także opracował pojęcie masy jako miary ilości materii, z której składa się ciało: „Ilość materii jest tym, co wzrasta wespół z jego gęstością i wielkością”.

Ta gorączkowa praca twórcza miała pewne skutki uboczne. Według świadectwa asystenta, który mieszkał razem z Isaakiem Newtonem:

„Jest on tak pochłonięty i oddany swym studiom, że je bardzo niewiele, czasem nawet zupełnie zapomina o jedzeniu. W tych wyjątkowych wypadkach, gdy zdecyduje się pójść do refektarza [...] wychodzi na ulicę, zatrzymuje się, uświadamia sobie pomyłkę i w pośpiechu powraca do swojej izby. [...] Czasem zaczyna pisać stojąc przy biurku i nie pozwalając sobie nawet na taką zwłokę, jaka byłaby konieczna dla przysunięcia sobie krzesła”.

Tak to właśnie bywa z uczonymi ogarniętymi twórczym zapałem.

Principia spadły na Anglię i całą Europę jak grom z jasnego nieba. Plotki na temat tego dzieła rozchodziły się szybko, zanim jeszcze zeszło z pras drukarskich. Newton już wcześniej cieszył się znakomitą reputacją wśród matematyków i fizyków; *Principia* sprawiły, że stał się postacią legendarną i że zainteresowali się nim tacy filozofowie, jak John Locke czy Voltaire. Był to niesłychany sukces. Prorocy i akolici, a nawet tacy znakomici krytycy, jak Christiaan Huygens i Gottfried Leibniz, wszyscy złączyli swe głosy w chórze pochwał dla niesłychanej głębi i znaczenia tego dzieła. Arcyrywal Newtona, Robert „Mały” Hooke, obdarzył *Principia* najwyższym komplementem, mówiąc, że jest to plagiat jego własnej pracy.

Gdy ostatnio odwiedzałem Uniwersytet w Cambridge, chciałem zobaczyć egzemplarz *Principiów*. Spodziewałem się, że znajdę książkę umieszczoną w szklanej gablocie wypełnionej helem. Nic podobnego, egzemplarz pochodzący z pierwszego wydania stał sobie na półce w bibliotece Wydziału Fizyki. Oto książka, która zmieniła naukę.

Skąd Newton czerpał inspirację? Korzystał z bogatej literatury dotyczącej ruchów planet, w tym także z bardzo pouczających prac Hooke'a. Te źródła odegrały zapewne równie ważną rolę, co potęga intuicji sir Isaaca, o której mówi nam powszechnie znana anegdota o spadającym jabłku. Ponoć pewnego popołudnia, gdy Księżyc był na niebie, Newton zobaczył spadające jabłko. Dostrzegł wtedy podobieństwo łączące te dwa ciała. Ziemia wywiera na jabłko, obiekt ziemski, oddziaływanie grawitacyjne, ale siła tu się nie kończy, tylko sięga dalej, nawet do Księżyca - ciała niebieskiego. Siła ta sprawia, że jabłko spada na ziemię. Ta sama siła powoduje, że Księżyc okrąża Ziemię. Newton połączył swoje równania i wszystko się zgadzało. W pierwszej połowie lat osiemdziesiątych XVII wieku Newton zjednoczył mechanikę niebios i mechanikę ziemską. Prawo powszechnego ciężenia pozwoliło wytłumaczyć misterny taniec Układu Słonecznego, pływy morskie, łączenie się gwiazd w galaktyki, galaktyk w gromady, nieczęste, lecz dające się przewidzieć pojawienia komety Halleya i jeszcze inne rzeczy. W 1969 roku NASA wysłała na Księżyc trzy osoby. Potrzebowali technologii ery podboju kosmosu, by odpowiednio wyekwipować się na tę wyprawę, ale najważniejsze równania zaprogramowane w pokładowych komputerach kierujących lotem rakiety na Księżyc i z powrotem miały już trzysta lat. Wszystkie sformułował Newton.

Kłopot z grawitacją

Przekonaliśmy się już, że w skali atomowej, powiedzmy podczas oddziaływania między elektronem a protonem, siła grawitacji jest tak nieznaczna, iż potrzebowaliśmy jedyńki z 41 zerami, by przyrównać ją do sił elektrycznych. Jest naprawdę słaba. W skali makroskopowej prawo grawitacji znajduje potwierdzenie w dynamice naszego Układu Słonecznego. Wielkim nakładem sił można je sprawdzić laboratoryjnie, używając bardzo czułej wagi skręceń. Ale kłopot z grawitacją w latach dziewięćdziesiątych naszego stulecia polega na tym, że jest jedyną z czterech znanych sił, która nie daje się pogodzić z teorią kwantową. Jak już wspomniałem, zidentyfikowaliśmy cząstki będące nośnikami oddziaływań elektromagnetycznego, słabego i silnego, ale cząstka przenosząca oddziaływanie grawitacyjne wciąż nam umyka. Nadaliśmy tej hipotetycznej cząstce nazwę - grawiton - ale jak dotąd nie udało nam się jej znaleźć. Zbudowano wielkie i czułe urządzenia, by wykryć fale grawitacyjne, które pojawiłyby się na skutek jakiejś kosmicznej katastrofy gdzieś we Wszechświecie. Mógłby to być wybuch supernowej, czarna dziura pożerająca jakąś zabłąkaną gwiazdę albo niezbyt prawdopodobne, ale możliwe zderzenie dwóch gwiazd neutronowych. Na razie nie wykryto żadnych śladów czegoś takiego, ale poszukiwania wciąż trwają.

Grawitacja stanowi największą przeszkodę na naszej drodze do złączenia fizyki cząstek elementarnych z kosmologią. Jesteśmy jak starożytni Grecy: jedyne, co możemy zrobić, to siedzieć i czekać, aż się coś wydarzy, bo żadne eksperymenty nie wchodzą w rachubę. Gdybyśmy mogli zderzyć ze sobą dwie gwiazdy, tak jak to robimy z protonami, niewątpliwie przyniosłoby to ciekawe rezultaty. Jeśli kosmologowie mają rację i teoria Wielkiego Wybuchu jest naprawdę dobrą teorią - a ostatnio zapewniano mnie, że wciąż jeszcze jest - to kiedyś w początkowej fazie istnienia Wszechświata wszystkie cząstki znajdowały się bardzo blisko siebie. Energia przypadająca na każdą z nich była ogromna. Siła grawitacji wzmocniona przez całą tę energię - która jest równoważna masie - staje się siłą o przyzwoitej mocy także i w skali atomowej. A atomem rządzi teoria kwantowa. Jeśli nie przyłączymy siły grawitacji do rodziny sił kwantowych, nigdy nie zrozumiemy szczegółów Wielkiego Wybuchu ani najgłębszej struktury cząstek elementarnych.

Isaac i jego atomy

Większość historyków nauki zgadza się co do tego, że Newton wierzył, iż materia zbudowana jest z cząstek. Grawitacja była jedynym rodzajem oddziaływania, które ujął w formie matematycznej. Według niego oddziaływanie między ciałami, czy to będzie Ziemia i Księżyc, czy Ziemia i jabłko, musi być wynikiem oddziaływań zachodzących między cząstkami składającymi się na te ciała. Zaryzykowałbym twierdzenie, że wynalezienie rachunku różniczkowego i całkowego ma coś wspólnego z wiarą Newtona w istnienie atomów. By zrozumieć siłę występującą, powiedzmy, między Ziemią a Księżycem, trzeba zastosować nasz Wzór II. Ale jaką wartość mamy przyjąć dla R - odległości, która je dzieli? Gdyby obiekty te miały bardzo małe rozmiary, nie byłoby problemu z wyznaczeniem R : równałoby się odległości między ich środkami. Aby się jednak dowiedzieć, jak oddziaływanie małej cząstki Ziemi wpływa na Księżyc, i aby zsumować wszystkie siły pochodzące od wszystkich cząstek, konieczna jest znajomość rachunku

różniczkowego i całkowego. Pozwala on na dodawanie nieskończonej liczby nieskończenie małych wielkości. I Newton wynalazł ten rachunek około roku 1666, kiedy, jak sam powiedział, jego umysł był „wyjątkowo zdalny do dokonywania odkryć”.

W XVII wieku nie dysponowano praktycznie żadnymi danymi na poparcie atomizmu. W *Principiach* Newton pisał, że musimy ekstrapolować dane z doświadczeń zmysłowych, by zrozumieć funkcjonowanie mikroskopowych cząstek, z których zbudowana jest materia. „Ponieważ twardość całości bierze się z twardości części [...] możemy słusznie wywnioskować twardość niepodzielnych cząstek nie tylko tych ciał, które wyczuwamy dotykiem, ale także wszystkich innych”.

Podobnie jak w przypadku Galileusza, badania Newtona nad optyką doprowadziły go do uznania, że światło jest strumieniem cząstek. Pod koniec książki zatytułowanej *Optyka* dokonał przeglądu ówczesnie panujących poglądów na naturę światła i ważył się na ten zapierający dech w piersiach skok:

„Czyż cząstki ciał nie mają pewnych własności, mocy czy sił, dzięki którym działają na odległość, nie tylko na promienie światła, które ulegają odbiciu, ugięciu czy załamaniu, ale także na siebie nawzajem, wytwarzając wielką część zjawisk przyrody? Bo przecież jest rzeczą wiadomą, że ciała działają na siebie nawzajem przyciąganiem grawitacyjnym, magnetycznym i elektrycznym i że te działania wyznaczają kształt i bieg przyrody. *Nie jest nieprawdopodobne, by istniały także i inne siły przyciągania poza tymi, [...] inne, które sięgają na małe odległości i z tego powodu umykają obserwacji; i niewykluczone, że przyciąganie elektryczne może sięgać na niewielkie odległości, nie będąc nawet wywołanym przez tarcie [podkreślenie moje]*”.

Oto mamy przewidywanie, intuicję, a może nawet wskazówki dotyczące Wielkiej Unifikacji - świętego Graala, którego obecnie poszukują fizycy. Czyż Newton nie nawoływał tu do podjęcia poszukiwań sił działających we wnętrzu atomu, znanych dziś jako słabe i silne? Sił, które w przeciwieństwie do grawitacji działają tylko na „małe odległości”.

Czytajmy dalej:

„Rozważywszy to wszystko, wydaje mi się prawdopodobne, że Bóg na początku uformował materię w postaci twardych, masywnych, nieprzenikliwych, ruchomych cząstek. [...] I te pierwotne cząstki są ciałami [...] tak twardymi, że nigdy nie ulegają zużyciu ani nie rozpadają się na części; żadna zwykła siła nie jest w stanie podzielić tego, co Bóg sam uczynił jednością, gdy stwarzał świat”.

Dowody były niewystarczające, ale Newton wyznaczył fizyce kurs, który konsekwentnie prowadził w kierunku mikroświata kwarków i leptonów. Poszukiwanie tej nadzwyczajnej siły, która pozwoli nam podzielić to, „co Bóg sam uczynił jednością”, stanowi dziś linię frontu badań w fizyce cząstek elementarnych.

Dziwne rzeczy

W drugim wydaniu *Optyki* Newton opatrzył swe konkluzje serią pytań. Są one tak trafne - i wciąż pozostają otwarte - że można się w nich dopatrzeć wszystkiego, czego się tylko zapragnie. Ale chyba uzasadnione jest twierdzenie, że Newton być może antycypował, w jakiś głęboko intuicyjny sposób, podwójny, korpuskularno-falowy charakter teorii kwantowej. Jednym z najbardziej niepokojących aspektów teorii Newtona jest zagad-

nienie oddziaływania na odległość. Ziemia przyciąga jabłko. Jabłko spada. Słońce przyciąga planety. Planety krążą wokół niego po eliptycznych torach. Jak to się dzieje? W jaki sposób dwa ciała, przedzielone tylko pustą przestrzenią, mogą przekazywać sobie nawzajem oddziaływanie? Według jednego z popularnych w owym czasie modeli, zjawisko to miał wyjaśnić hipotetyczny eter. Eter - niewidoczny i niematerialny ośrodek przenikający całą przestrzeń - miał umożliwić nawiązanie kontaktu między ciałami A i B.

Jak niedługo zobaczymy, James Clerk Maxwell uchwycił się idei eteru i powierzył mu funkcję przenoszenia fal elektromagnetycznych. Einstein obalił tę ideę w 1905 roku. Koncepcja eteru przeżywa wzloty i upadki, a obecnie wierzymy, że jakaś nowa jego wersja (tak naprawdę chodzi o próżnię Demokryta i Anaksymandra) jest kryjówką Boskiej Cząstki.

Newton w końcu odrzucił ideę eteru. Jego atomistyczne poglądy wymagałyby, żeby eter także miał budowę cząsteczkową, a to było dla niego nie do przyjęcia. Poza tym eter musiałby przenosić oddziaływanie tak, aby nie zaburzać przy tym ruchu planet na ich niezmiennych orbitach.

Następujący paragraf z *Principiów* ilustruje poglądy Newtona na ten temat:

„Istnieje przyczyna, bez której siły poruszające nie rozprzestrzeniałyby się w przestrzeni. Przyczyną taką może być jakieś centralnie położone ciało (jak magnes w środku siły magnetycznej) albo cokolwiek innego, czego jeszcze nie znamy. Mam zamiar tylko podać matematyczny opis tych sił, bez rozważania ich fizycznych przyczyn i właściwości”.

Gdyby wysłuchali tych słów fizycy w czasie współczesnego seminarium, powstałoby ze swych miejsc i zgotowali mówcy owację, gdyż Newton porusza tu bardzo współczesne zagadnienie: sprawdzianem prawdziwości teorii jest jej zgodność z wynikami eksperymentu i obserwacji. Nie ma więc znaczenia, że Newton (i jego współcześni wielbiciel) nie znał odpowiedzi na pytania: dlaczego grawitacja? skąd się ona bierze? Te problemy należą do dziedziny filozofii tak długo, dopóki ktoś nie wykaże, że grawitacja jest konsekwencją jakiegoś głębszego zjawiska, jakiejś symetrii, która być może dotyczy wielowymiarowej czasoprzestrzeni.

Dość filozofowania. Newton wyraźnie posunął naprzód nasze poszukiwania a-tomu, ustalając rygorystyczne reguły postępowania, reguły formułowania uogólniających wniosków, które można było stosować do szerokiego wachlarza zagadnień fizycznych. Gdy te reguły zostały przyjęte, odegrały ogromną rolę w rozwoju sztuk stosowanych, takich jak inżynieria czy technika. Mechanika Newtona i towarzysząca jej nowa matematyka stanowią podstawę, na której wzniesiona została piramida nauk fizycznych i technicznych. Zmiany przez nie spowodowane są odpowiednikiem rewolucji, jaka dokonana się w naszym sposobie myślenia. Bez niej niemożliwa byłaby rewolucja przemysłowa ani nieustanne, systematyczne poszukiwania nowej wiedzy i nowych technologii. Oznacza to przejście od statycznego społeczeństwa, biernie oczekującego, aż coś się wydarzy, do społeczeństwa dynamicznego, pragnącego zrozumieć, zdającego sobie sprawę z tego, że wiedza umożliwia kontrolę. Spuścizna Newtona dała redukcjonizmowi potężny impuls do dalszego rozwoju.

Wpływ Newtona na rozwój fizyki i matematyki oraz jego oddanie dla idei atomizmu są dokładnie udokumentowane. Niejasne natomiast jest, jakie znaczenie dla prac naukowych miała „druga strona” jego życia: rozległe badania w dziedzinie alchemii i przywiązanie do okultystycznej, religijnej filozofii, szczególnie do idei hermetyzmu wy-

wodzącej się z magicznych praktyk staroegipskich kapłanów. Ten aspekt jego życia był w znacznym stopniu nieznany. Piastując odpowiedzialne stanowiska - profesora katedry im. Lucasa w Cambridge (obecnie zajmuje je Stephen Hawking), a potem wysoko na szczeblach drabiny politycznej w Londynie - nie mógł sobie pozwolić na to, by wyszło na jaw jego przywiązanie do wywrotowych praktyk religijnych. Ujawnienie tej strony życia, jeśli nie okryłoby go hańbą, na pewno postawiłoby go w kłopotliwym położeniu.

Pozwólmy Einsteinowi wyrazić końcowe uwagi na temat prac Newtona:

„Newtonie, wybac mi; znalazłeś jedyną drogę, którą w Twojej epoce mógł znaleźć tylko człowiek o najwyższych zdolnościach umysłowych i mocy twórczej. Pojęcia, które wypracowałeś, do dziś jeszcze kierują naszym myśleniem w fizyce, choć wiemy teraz, że jeśli mamy osiągnąć głębsze zrozumienie zachodzących w świecie związków, pojęcia te trzeba będzie zastąpić innymi, znacznie bardziej wykraczającymi poza sferę bezpośredniego doświadczenia”.

Dalmatyński prorok

I jeszcze jedna uwaga na zakończenie pierwszego etapu - wieku mechaniki, wielkiej ery fizyki klasycznej. Wyrażenie „wyprzedzał swą epokę” często bywa nadużywane. Ale ja i tak się nim posłużę. Nie w odniesieniu do Galileusza czy Newtona. Obaj pojawili się zdecydowanie we właściwym czasie - ani za późno, ani za wcześnie. Grawitacja, eksperymenty, pomiar, dowodzenie matematyczne... - wszystko to wisiało już w powietrzu. Galileusz, Kepler, Brahe i Newton byli za życia akceptowani - cieszyli się sławą! - gdyż ówczesna społeczność naukowa dojrzała już do przyjęcia ich idei. Nie wszyscy jednak mieli aż tyle szczęścia.

Rudjer Josip Bošković, urodzony w Dubrowniku w 1711 roku na 16 lat przed śmiercią Newtona, znaczną część życia spędził w Rzymie. Bošković gorąco popierał teorie Newtona, ale miał pewne trudności z zaakceptowaniem prawa powszechnego ciężenia. Nazywał je klasycznym ograniczeniem, dostatecznie dobrym przybliżeniem sytuacji, w której odległości są bardzo duże. Mówił, że jest ono „prawie całkiem poprawne, ale istnieją - bardzo niewielkie, co prawda - odchylenia od tego prawa”. Sądził, że to klasyczne prawo musi ulec pełnemu załamaniu w skali atomowej, gdzie siły przyciągania zastąpione są oscylacjami między siłami przyciągania i odpychania. Zdziwiająca myśl jak na osiemnastowiecznego uczonego.

Bošković zmagał się też ze starym problemem „oddziaływania na odległość”. Ponieważ był przede wszystkim geometrą, wymyślił pojęcie pola sił, by wyjaśnić, w jaki sposób siły rozciągają kontrolę nad odległymi ciałami. Ale to jeszcze nie wszystko!

Miał on jeszcze jeden pomysł, pomysł zupełnie szalony jak na XVIII wiek (a może i na każdy inny również). Mówił, że materia składa się z niewidocznych i niepodzielnych a-tomów. Nie ma tu niczego szczególnie nowego. Leukippos, Demokryt, Galileusz, Newton z łatwością by się z nim zgodzili. Ale teraz uwaga: według Boškovića cząstki te nie mają wymiarów, to znaczy są punktami geometrycznymi. Oczywiście, jak to się zdarza z wieloma nowymi ideami w nauce, także i ta miała swych prekursorów - być może w starożytnej Grecji, nie mówiąc już o wskazówkach zawartych w pismach Galileusza. Jak może przypominać sobie, drogi Czytelniku, z lekcji geometrii, punkt jest po prostu miejscem, nie ma żadnych wymiarów. I teraz Bošković wysuwa sugestię, że materia

składa się z cząstek pozbawionych wymiarów! Zaledwie kilkadziesiąt lat temu znaleźliśmy cząstkę, do której ten rysopis pasuje. Jest nią kwark.

Jeszcze wrócimy do pana Boškovića.

6. Dalsze poszukiwania atomu: chemicy i elektrycy

Naukowiec nie buntuje się przeciw Wszechświatowi, lecz go akceptuje. Wszechświat jest dla niego wyborynym daniem, którym można się delektować, królestwem do zbadania, jest jego przygodą i nie kończąca się rozkoszą. Bywa usłużny albo zwodniczy, ale nigdy nudny. Jest wspaniały i w szczególe, i w ogóle. Mówiąc krótko, odkrywanie jest najszlachetniejszym zajęciem dla dżentelmena.

I. I. RABI

Przyznaję: nie tylko fizycy zajmowali się poszukiwaniami demokrytejskiego atomu. Chemicy niezaprzeczalnie odcisnęli swoje piętno, szczególnie w ciągu długiej epoki (z grubsza w latach 1600-1900) rozwoju fizyki klasycznej. Różnice między fizykami a chemikami nie są nie do przewidzenia. Ja sam wystartowałem jako chemik, a zwróciłem się ku fizyce częściowo dlatego, że wydawała mi się łatwiejsza. Od tego czasu wielokrotnie zauważyłem, że niektórzy z moich przyjaciół nawet rozmawiają z chemikami.

Człowiek, który odkrył 20 centymetrów niczego

Chemicy zajęli się czymś, czego wcześniej nie zrobili fizycy. Przeprowadzali doświadczenia z atomami. Galileusz, Newton i inni, mimo znacznych osiągnięć eksperymentalnych, atomami zajmowali się wyłącznie teoretycznie. Nie dlatego, że się lenili, tylko po prostu nie mieli odpowiednich urządzeń. To chemicy przeprowadzili eksperymenty, które zmusiły atomy do ujawnienia swej obecności. W tym rozdziale zajmiemy się bogatym materiałem dowodowym zebrany w sprawie demokrytejskiego atomu. Zobaczmy wiele fałstartów, parę obiecujących, ale fałszywych tropów i błędnie zinterpretowanych rezultatów, które zawsze są zmorą dla eksperymentatora.

Zanim zajmiemy się chemikami z prawdziwego zdarzenia, muszę wspomnieć o pewnym uczonym, którego ze względu na jego prace, zmierzające do przywrócenia atomizmowi statusu koncepcji naukowej, musimy uznać częściowo za chemika, a częściowo za mechanika. Jest nim Evangelista Torricelli (1608-1647). Powtórzmy: Demokryt mówił, że „nie istnieje nic oprócz atomów i pustej przestrzeni; wszystko poza tym jest opinią”. Dlatego też, aby wykazać słuszność teorii atomistycznej, trzeba znaleźć atomy, ale trzeba także znaleźć dzielącą je pustą przestrzeń. Arystoteles zdecydowanie sprzeciwiał się samemu pojęciu próżni, a jeszcze w epoce renesansu Kościół utrzymywał, że „natura nie znosi próżni”.

I oto na scenę wkracza Torricelli. Był jednym z uczniów Galileusza w końcowym okresie jego działalności. W 1642 roku mistrz polecił Torricellemu, by zajął się problemem, z którym zwrócili się do niego florency kopacze studzien. Zauważyli oni, że woda w pompach ssących nigdy nie daje się unieść na wysokość większą niż 10 metrów. Dlaczego tak się dzieje? Wstępna hipoteza wysunięta przez Galileusza i innych brzmiała, że próżnia jest „siłą” i że częściowa próżnia, wytworzona w rurze przez pompę, pociąga wodę do góry. Galileusz, oczywiście, nie chciał sobie zawracać głowy problemami kopaczy studzien, więc oddelegował do nich Torricellego.

Torricelli uważał, że to wcale nie próżnia pociąga wodę, lecz normalne ciśnienie powietrza wpycha ją do rury. Gdy pompa zmniejsza ciśnienie powietrza nad kolumną wody, normalne ciśnienie poza pompą naciska mocniej na lustro wody gruntowej i wciąga ją do rury. Torricelli sprawdził tę hipotezę w rok po śmierci Galileusza. Rozumował w ten sposób: skoro rtęć jest 13,5 razy cięższa od wody, to powietrze powinno ją wypchnąć na wysokość 13,5 razy mniejszą niż wypycha wodę, czyli na około 76 cm. Zdobyl grubą szklaną rurę o długości około metra, która miała zamknięty jeden koniec, i przeprowadził bardzo prosty eksperyment. Wypełnił ją po brzegi rtęcią, przykrył, odwrócił do góry dnem, umieścił w misie wypełnionej rtęcią i usunął przykrywkę. Część rtęci wylała się do misy, ale - zgodnie z przewidywaniem - w rurze zostało około 76 cm płynnego metalu.

Często mówi się, że podczas tego fundamentalnego dla historii fizyki wydarzenia został wynaleziony barometr. I jest to zgodne z prawdą. Torricelli zauważył, że wysokość słupa rtęci zmieniała się z dnia na dzień, odpowiednio do wahań ciśnienia atmosferycznego. Jednak z naszego punktu widzenia wyniki jego eksperymentu mają daleko głębsze znaczenie. Zapomnijmy o 76 centymetrach rtęci wypełniającej trzy czwarte rury. Dla nas istotne są pozostałe 24 cm u jej szczytu. Ten zamknięty kawałek rurki nie zawierał niczego. Naprawdę niczego. Żadnej rtęci, żadnego powietrza, nic! No, prawie nic. To była całkiem przyzwoita próżnia, w której zgromadziło się tylko nieco oparów rtęci; ich ilość jest zależna od temperatury. Mówimy, że mamy do czynienia z próżnią, kiedy ciśnienie wynosi około 10^{-6} tora. (Tor, nazwany tak na cześć Evangelisty, to jednostka miary ciśnienia. 10^{-6} tora równe jest około jednej miliardowej normalnego ciśnienia atmosferycznego). Nowoczesne pompy próżniowe pozwalają osiągnąć 10^{-11} tora, a nawet jeszcze mniej. W każdym razie Torricelli otrzymał pierwszą sztucznie wytworzoną próżnię wysokiej jakości. Wniosek ten narzucał się nieubłaganie. Niezależnie od tego, czy natura znosi próżnię, czy nie, musi ją jakoś tolerować. Teraz, kiedy udowodniliśmy już istnienie pustej przestrzeni, przydałyby się jakieś atomy, które można by w niej umieścić.

Ściskanie gazu

Wkracza Robert Boyle. Tego irlandzkiego chemika (1627-1691) krytykowano za to, że sposobem myślenia bardziej przypomina fizyka niż chemika, niemniej jego osiągnięcia niewątpliwie zapisały się w historii chemii. Był eksperymentatorem, którego doświadczenia często spełzały na niczym, ale mimo to sprawił, że idea atomizmu umocniła się w Anglii i Europie. Nazywa się go czasem Ojcem Chemii.

Pod wpływem prac Torricellego Boyle uległ fascynacji próżnią. Zatrudnił Roberta Hooke'a tego samego, który tak bardzo kochał Newtona - by zbudował dla niego pompę próżniową. W ten sposób rozbudził w sobie zainteresowanie gazami, które, jak sądził, musiały stanowić klucz do atomizmu. Możliwe, że pomógł mu nieco Robert Hooke, który zwrócił uwagę, że ciśnienie, wywierane przez gaz na ściany naczynia - na przykład przez powietrze rozpychające balon - może być rezultatem naporu atomów. Nie widzimy pojedynczych wybrzuszeń, spowodowanych przez poszczególne atomy, bo jest ich za dużo (miliardy), co sprawia, że postrzegamy gładko rozciągający się balon.

W swym doświadczeniu Boyle, podobnie jak Torricelli, użył rtęci. Wziął szklaną rurkę w kształcie litery J o długości 5 metrów. Zasklepił jej krótsze ramię i do tak sprep-

rowanego naczynia wlewał rtęć przez dłuższe ramię. W pewnym momencie rtęć prze-
rwała połączenie między oboma ramionami rurki. Boyle kontynuował wlewanie. Im wię-
cej rtęci wlewał, tym mniej miejsca zajmowało powietrze uwięzione w zamkniętej części
rurki i jednocześnie zwiększało się jego ciśnienie, co mógł łatwo stwierdzić, mierząc
wysokość rosnącego słupka rtęci w otwartym ramieniu. Boyle odkrył, że objętość gazu
jest odwrotnie proporcjonalna do ciśnienia, jakie nań działa. Ciśnienie to pochodziło od
dodatkowej ilości rtęci w dłuższym ramieniu i naciskającego na nią powietrza atmosferycznego.
Jeśli podwoił ciśnienie, dolewając odpowiednią ilość rtęci, objętość powietrza
zmniejszyła się o połowę. Gdy ciśnienie wzrosło trzykrotnie, objętość skurczyła się do
jednej trzeciej. Zjawisko to zostało ujęte w prawie Boyle'a, które do dziś stanowi filar
chemii.

Istotne są szokujące wnioski płynące z tego eksperymentu: można sprężać powie-
trze i dowolny inny gaz. Aby wytłumaczyć to zjawisko, można wyobrazić sobie gaz jako
zbiorowisko atomów porozdzielanych pustą przestrzenią. Gdy ciśnienie wzrasta, atomy
skupiają się bliżej siebie. Czy to dowodzi istnienia atomów? Niestety, nie. Można podać
także inne wyjaśnienia. Tak więc eksperyment Boyle'a dostarczył tylko danych zgod-
nych z koncepcją atomizmu. Dane te były na tyle przekonujące, że Newton i inni uznali
za słuszną atomową teorię materii. W każdym razie sprężenie powietrza co najmniej
podało w wątpliwość arystotelesowskie przekonanie o ciągłości materii. Pozostał prob-
lem cieczy i ciał stałych, które nie poddawały się ścisłaniu tak łatwo, jak gazy. Nie
znaczyło to, że nie składają się one z atomów, ale że jest w nich mniej pustej prze-
strzeni.

Boyle był mistrzem eksperymentu, na który, mimo osiągnięć Galileusza i innych
uczonych XVII wieku, wciąż patrzono podejrzliwie. Boyle prowadził długotrwałą debatę z
Benedyktem Spinozą, holenderskim filozofem (i szlifierzem soczewek), nad tym, czy
eksperyment może dostarczyć dowodów. Wedle Spinozy, tylko logiczne rozumowanie
miało tę moc, eksperyment był jedynie użytecznym narzędziem służącym do potwier-
dzenia lub odrzucenia jakiejś idei. Tacy wielcy uczeni, jak Huygens i Leibniz, także po-
dawali w wątpliwość wartość doświadczeń. Eksperymentatorom zawsze wiatr wieje w
oczy.

Wysiłki Boyle'a mające na celu znalezienie dowodu na istnienie atomów (on sam
wolał termin „ciałka”) przyczyniły się do rozwoju chemii, w której w owym czasie pano-
wał nielichy bałagan. Wciąż jeszcze powszechnie wierzono, że budulcem materii są ży-
wioły. Zaczęto od Empedoklesowych: powietrza, ziemi, ognia i wody. Ale z biegiem
czasu okazało się, że trzeba dodać jeszcze inne, między innymi: sól, siarkę, rtęć, flegmę
(flegmę?), olej, spirytus, kwas i zasadę. W XVII wieku substancje te nie tylko uznawano
za elementarne składniki materii, lecz wierzono także, iż są one istotnymi składnikami
każdego jej rodzaju. Kwas, by posłużyć się tu tylko jednym przykładem, powinien być
znajdować się w każdym związku. Jakże skołowani musieli być w tamtych czasach
chemicy! Przy takim założeniu nie sposób przeanalizować nawet najprostszej reakcję.
Ciałka Boyle'a otworzyły drogę dla bardziej redukcjonistycznej i prostszej metody ana-
lizowania związków chemicznych.

Zabawa w nazwy

Jednym z problemów, któremu musieli stawić czoła chemicy w XVII i XVIII wieku, był zupełny brak porządku w nazewnictwie chemicznym. Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794) zmienił ten stan w 1787 roku, publikując klasyczne dzieło *Méthode de Nomenclature Chimique*. Można by go nazwać Newtonem chemii (możliwe, że chemicy nazywają Newtona Lavoisierem fizyki).

Lavoisier był zadziwiającym człowiekiem. Odniósł pewne osiągnięcia jako geolog, był pionierem w opracowywaniu naukowych podstaw rolnictwa, zdolnym finansistą i reformatorem społecznym - miał pewien udział w roznieceniu Rewolucji Francuskiej. Wprowadził nowy system miar i wag, który z czasem przerodził się w układ metryczny, używany dziś w cywilizowanych krajach. (Stany Zjednoczone, by nie zostać zbyt daleko w tyle, z wolna zaczynają wprowadzać układ SI).

W XVII i pierwszej połowie XVIII wieku zgromadzono całą górę danych, ale były one beznadziejnie pogmatwane. Nazwy rozmaitych substancji - pomfolyks, kolkotar, masło arseniku, kwiaty cynku, orpiment, wojowniczy etiop - były efektowne, ale nie pozwalały się domyślać jakiegokolwiek głębszego porządku. Jeden z nauczycieli Lavoisiera powiedział mu, że „sztuka rozumowania nie jest niczym więcej, jak tylko dobrze uporządkowanym językiem”, i on wzięł to sobie do serca. Podjął się uporządkowania i opracowania wszystkich nazw chemicznych. Zmienił wojowniczy etiop na tlenek żelaza, orpiment został siarczkiem arsenu. Rozmaite przedrostki („nad-”, „pod-”) oraz przyrostki („-owy”, „-awy”, „-yn”) pomogły uporządkować i skatalogować niezliczoną liczbę związków chemicznych. Cóż szczególnego tkwi w imieniu? Czasem kryje się w nim przeznaczenie. Czyż Archibald Leach dostałby te wszystkie wspaniałe role filmowe, gdyby nie zmienił swego imienia i nazwiska na Cary Grant?

Lavoisierowi nie poszło to tak łatwo. Zanim zrewidował nomenklaturę, musiał zrewidować samą teorię chemiczną. Jedno z większych jego osiągnięć dotyczyło własności gazów i spalania. W XVIII wieku chemicy wierzyli, że podgrzewana woda przeobrażała się w powietrze, które według nich miało być jedynym prawdziwym gazem. Na podstawie swych badań Lavoisier wykazał, że dowolny pierwiastek może występować w każdym z trzech stanów skupienia: stałym, ciekłym i gazowym. Dowiódł także, że spalanie jest reakcją chemiczną polegającą na łączeniu się różnych substancji z tlenem. Usunął z nauki teorię flogistonu - arystotelejską w swej naturze przeszkodę na drodze do osiągnięcia prawdziwego rozumienia przebiegu reakcji chemicznych. Co więcej, styl badań Lavoisiera - oparty na precyzji, najwyższej technice eksperymentalnej i krytycznej analizie zebranych danych - naprowadził chemię na nowoczesny kurs. Choć jego prace nie wносиły wiele do teorii atomistycznej, to bez podwalin, które on położył, dziewiętnastowieczni uczeni nie mogliby znaleźć pierwszego bezpośredniego dowodu na istnienie atomów.

Pelikan i balon

Woda fascynowała Lavoisiera. Za jego czasów wielu uczonych wciąż uważało, że woda jest podstawowym żywiołem i że nie można jej rozłożyć na części składowe. Niektórzy wierzyli także w transmutację; sądzili, że woda może ulec przemianie, na przykład, w ziemię. Nawet można było się o tym przekonać doświadczalnie. Jeśli gotować wodę odpowiednio długo, to okaże się, że na dnie naczynia zbierze się stały osad. To woda uległa transmutacji w jakiś inny pierwiastek - mówili ci uczeni. Nawet wielki Robert Boy-

le w to wierzył. Co więcej, przeprowadził doświadczenie, które tego dowodziło. Wykazał mianowicie, że rośliny rosną dzięki temu, iż wciągają wodę. Ergo, woda ulega transmutacji w łądygi, liście, kwiaty etc. W tej sytuacji staje się jasne, dlaczego tak wielu ludzi nie ufało eksperymentom. Podobne wnioski wystarczą, żeby w pełni zgodzić się ze Spinozą.

Lavoisier zdawał sobie sprawę, że w wielu eksperymentach zaniedbano pomiary. Przeprowadził swój własny eksperyment, polegający na tym, że gotował wodę w specjalnym naczyniu, zwanym pelikanem. Pelikan jest tak skonstruowany, że para powstała na skutek wrzenia wody gromadzi się i kondensuje w kulistej komorze, skąd dwiema rurkami powraca do tej części naczynia, w której odbywa się wrzenie. W ten sposób proces przebiega bez żadnych strat wody. Lavoisier dokładnie zważył naczynie i destylowaną wodę przeznaczoną do doświadczenia. Następnie zaczął ją gotować i tak gotował bez przerwy przez 101 dni. W wyniku tego długotrwałego eksperymentu w naczyniu zebrała się pewna ilość osadu. Lavoisier zważył wtedy wszystko z osobna: wodę, pelikan i osad. Po stu i jednym dniu gotowania woda ważyła dokładnie tyle samo co na początku. To powinno nam coś powiedzieć o skrupulatności Lavoisiera. Jednak pelikan ważył nieco mniej. Ciężar osadu był równy brakującemu ciężarowi naczynia. Dlatego Lavoisier uznał, że otrzymany osad nie jest przeobrażoną wodą, ale rozpuszczonym szkłem, krzemionką pochodzącą z naczynia. Wykazał też, że eksperymenty pozbawione precyzyjnych pomiarów są bezużyteczne, a nawet mylące. Waga laboratoryjna była jego skrzypcami, grał na niej, by zrewolucjonizować chemię.

Taki był koniec transmutacji. Jednak wielu ludzi, w tym także sam Lavoisier, wciąż wierzyło, że woda jest jednym z żywiołów, podstawowym pierwiastkiem. Koniec tej iluzji nastąpił dopiero wtedy, gdy Lavoisier wynalazł naczynie o dwóch szyjkach. Używał go w ten sposób, że wpuszczał przez te szyjki różne gazy w nadziei, że się połączą i w ten sposób powstanie jakaś trzecia substancja. Pewnego dnia postanowił wypróbować tlen i wodór. Spodziewał się, że może powstać jakiś kwas. Otrzymał wodę. Pisał, że była „czysta jak destylowana woda”. Czemu nie? Zrobił ją przecież dokładnie według przepisu. Stało się oczywiste, że woda nie jest pierwiastkiem, lecz złożoną substancją, którą można wyprodukować, biorąc dwie części wodoru i jedną część tlenu.

W roku 1783 miało miejsce wydarzenie historyczne, które pośrednio przyczyniło się do dalszego rozwoju chemii. Bracia Montgolfier dokonali pierwszych załogowych lotów balonem wypełnionym ciepłym powietrzem. Niedługo potem J. A. C. Charles (*nota bene* nauczyciel fizyki) wzniósł się na wysokość trzech kilometrów za pomocą balonu wypełnionego wodorem. Zrobiło to wielkie wrażenie na Lavoisierze. Uznał, że balony dają wspaniałe możliwości wznoszenia się ponad chmury i prowadzenia badań meteorologicznych. Wkrótce powołano do życia komitet, którego celem było opracowanie tanich metod produkcji gazu dla potrzeb lotów balonowych. Lavoisier zorganizował masową produkcję wodoru. Uzyskiwał go w wyniku rozkładu wody na jej składowe podczas przesączania jej przez lufę armatnią wypełnioną gorącymi żelaznymi pierścieniami.

Teraz nikt mający odrobinę zdrowego rozsądku nie utrzymywał już, że woda jest pierwiastkiem. Ale Lavoisiera czekała jeszcze jedna wielka niespodzianka. Rozszczepił już ogromne ilości wody, a rachunek zawsze wychodził taki sam: z wody można było otrzymać wodór i tlen w ilościach wyrażających się wagowym stosunkiem 8:1. Ewidentnie było to dziełem jakiegoś zgrabnego mechanizmu, który można by wytłumaczyć, odwołując się do atomów.

Lavoisier nie wdawał się w spekulacje na temat atomizmu, mówił tylko, że u podstaw chemii leżą proste i niepodzielne cząstki, ale prawie niczego o nich nie wiemy. Niestety, nie miał okazji przejść na emeryturę i spokojnie spisywać pamiętników, w których mógłby rozwinąć swą koncepcję atomów. Mimo że na początku popierał Rewolucję, w czasie Rządów Terroru wypadł z łask i w 1794 roku posłano go na szafot. Miał wtedy 50 lat.

Nazajutrz po egzekucji matematyk Joseph Louis Lagrange tak podsumował tę tragedię: „Tylko moment zajęło im ścięcie tej głowy, ale i stu lat może być za mało, by wyrosła do niej podobna”.

Z powrotem do atomu

Przedstawiciel następnego pokolenia, skromny angielski nauczyciel John Dalton (1766-1844) zajął się badaniem wniosków płynących z prac Lavoisiera. W Daltonie znaleźlibyśmy wreszcie typowy, filmowy typ naukowca. Wydaje się, że wiódł zupełnie monotony tryb życia. Nie ożenił się, gdyż, jak mówił: „mam głowę nazbyt wypełnioną trójkątami, procesami chemicznymi, eksperymentami z elektrycznością oraz tym podobnymi rzeczami, bym mógł myśleć o małżeństwie”. Wielkie urozmaicenie stanowił dla niego spacer lub udział w spotkaniu sekty kwakrów.

Dalton rozpoczął karierę jako nauczyciel w szkole z internatem, gdzie wolny czas spędzał na lekturze dzieł Newtona i Boyle'a. Tkwił na tej posadzie przez ponad dziesięć lat, zanim udało mu się zostać wykładowcą matematyki na wyższej uczelni w Manchesterze. Gdy już tam przybył, poinformowano go, że ma także uczyć chemii. Narzekał na przeciążenie pracą, mimo że uczył 21 godzin tygodniowo! W 1800 roku zwolnił się stamtąd i otworzył własną akademię, dzięki czemu miał wreszcie znowu dość czasu, by poświęcać się badaniom chemicznym. Do dnia, w którym ogłosił atomistyczną teorię materii (co wydarzyło się między 1803 a 1808 rokiem), Dalton uważany był przez społeczność naukową raczej za amatora. O ile wiemy, to on jako pierwszy formalnie wskrzesił demokrytejski termin „atom”, mający oznaczać maleńkie, niepodzielne cząstki, z których składa się materia. Wprowadził jednak pewną modyfikację. Przypomnijmy, że Demokryt mówił, iż atomy różnych substancji mają różne kształty. W ujęciu Daltona ich najistotniejszą własność stanowił ciężar.

Atomistyczna teoria Daltona była jego największym osiągnięciem naukowym. Niezależnie od tego, czy teoria ta wisiała już w powietrzu (wisiała) albo czy historia przypisała mu zbyt wielką zasługę (według niektórych historyków - zbyt wielką), nikt nie może kwestionować ogromnego wpływu, jaki atomizm wywarł na rozwój chemii - dziedzinę wiedzy, która wkrótce miała się stać jedną z najbardziej wpływowych nauk. Bardzo dobrze, że to chemia dostarczyła pierwszego eksperymentalnego dowodu świadczącego o realności atomów. Przypomnijmy sobie marzenie starożytnych Greków: odkryć niezmienną *arche* w świecie, gdzie zmienność towarzyszy nam na każdym kroku. A-tom rozwiązywał ten kryzys. Zmieniając konfiguracje a-tomów można dokonywać wszelkich zmian, ale fundament naszej egzystencji - sam a-tom - pozostaje niezmienny. W chemii stosunkowo niewielka liczba atomów daje nieograniczoną różnorodność z powodu mnóstwa możliwych kombinacji: atom węgla może połączyć się z jednym lub dwoma atomami tlenu, wodór z tlenem albo z chlorem, albo z siarką i tak dalej. A jednak

atomy wodoru zawsze są atomami wodoru - wszystkie zupełnie identyczne i niezmiennie. No, ale znowu się zagalopowaliśmy i zapomnieliśmy o naszym bohaterze, Daltonie.

Dalton zauważył, że własności gazów najlepiej dają się wytłumaczyć przy założeniu, iż są one zbudowane z atomów. Wykorzystał tę ideę także przy analizowaniu reakcji chemicznych. Stwierdził, że związek chemiczny zawsze zawiera te same ilości wagowe składających się nań pierwiastków. Na przykład węgiel i tlen łączą się w tlenek węgla. Żeby ów związek powstał, zawsze potrzeba 12 g węgla i 16 g tlenu (albo 12 funtów węgla i 16 funtów tlenu). Niezależnie od rodzaju stosowanych jednostek, stosunek zawsze pozostaje ten sam: 12:16. Jak to uzasadnić? Jeśli atom węgla waży 12 jednostek, a atom tlenu 16, to makroskopowy ciężar węgla i tlenu zużytych na wytworzenie tlenku węgla będzie można wyrazić tym samym stosunkiem. Ten jeden przykład nie byłby jeszcze wystarczającym dowodem na rzecz istnienia atomu. Jeśli jednak w związkach wodoru i tlenu albo wodoru i węgla względne ciężary zużytego wodoru, węgla i tlenu zawsze pozostają w stosunku 1:12:16, to po prostu zaczyna już brakować innych wyjaśnień. Gdy tę samą logikę zastosuje się do wielu dziesiątków związków, atomy pozostają jedynym sensownym uzasadnieniem.

Dalton zrewolucjonizował naukę, oznajmiając, że atom jest podstawową jednostką pierwiastka chemicznego i że każdy rodzaj atomów ma swą własną charakterystyczną wagę. Tak oto pisał w roku 1808:

„Są trzy odmiany ciał albo trzy stany, na których chemicy szczególnie skupiali swą uwagę, a mianowicie te, które określa się jako ciecze elastyczne, ciecze i ciała stałe. Bardzo słynnym przypadkiem jest woda - ciało, które w pewnych okolicznościach może występować we wszystkich trzech stanach. W parze rozpoznajemy doskonale elastyczną ciecz, a w lodzie - ciało stałe. Te obserwacje niezauważenie przywiodły nas do wniosku, dość powszechnie akceptowanego, że wszystkie ciała o postrzegalnych rozmiarach, czy to ciekłe, czy stałe, składają się z wielkiej liczby niezmiernie małych cząsteczek albo atomów materii złączonych ze sobą dzięki siłom przyciągania, które są mniej lub bardziej silne zależnie od okoliczności [...].

Analiza i synteza chemiczna polegają jedynie na porządkowaniu i rozdzielaniu cząstek i ich wzajemnym łączeniu. Żadne chemiczne procesy nie mogą doprowadzić do stworzenia ani do zniszczenia atomów. Równie dobrze moglibyśmy usiłować umieścić nową planetę na orbicie wokół Słońca albo zniszczyć już istniejącą, jak stworzyć lub zniszczyć atom wodoru. Wszystkie zmiany, jakie możemy wprowadzić, polegają na oddzielaniu cząstek, które są złączone albo zmieszane, oraz łączeniu tych, które przedtem były od siebie oddalone”.

Interesujący jest kontrast między stylami uprawiania nauki przez Lavoisiera i Daltona. Lavoisier dokonywał bardzo skrupulatnych pomiarów, co przyniosło efekty w postaci całkowitej przebudowy metodologii chemicznej. Dalton mylił się w wielu miejscach. Błędnie podał względny ciężar tlenu do wodoru jako 7 zamiast 8. Mylił się co do składu wody i amoniaku. Niemniej dokonał jednego z najbardziej znaczących odkryć naukowych swej epoki: po około 2200 latach spekulacji i mętnych hipotez Dalton potwierdził wreszcie, że atomy rzeczywiście istnieją. Zaproponował nowy pogląd, który „jeśli zostanie wprowadzony, co jak nie wątpię z czasem się stanie, spowoduje nadzwyczaj ważne zmiany w sposobie uprawiania chemii i przekształci ją w naukę o wielkiej prostocie”. Nie używał wyrafinowanej aparatury - mikroskopów o wielkiej zdolności rozdzielczej, akceleratorów cząstek; jego narzędzia to parę próbek, waga laboratoryjna, najświeższa literatura chemiczna i twórcza inspiracja.

To, co Dalton nazwał atomem, oczywiście nie było a-tomem zapowiedzianym przez Demokryta. Wiemy dziś, że atom tlenu nie jest niepodzielny, że ma złożoną strukturę. Ale nazwa się przyjęła. I dziś zwyczajowo atomem nazywamy chemiczny atom Daltona, najmniejszą porcję pierwiastka chemicznego takiego, jak wodór, tlen, węgiel czy uran.

Tytuł na pierwszej stronie gazety „Royal Enquirer” w 1815 roku:

CHEMIK ZNAJDUJE CZĄSTKĘ ELEMENTARNĄ,
PORZUCA BOA DUSICIELE I MOCZ.

Od czasu do czasu zdarza się, że jakiś uczony dokona spostrzeżenia tak prostego i eleganckiego, iż po prostu musi ono być prawdziwe. Spostrzeżenie to wydaje się za jednym zamachem rozwiązywać problem, który dręczył uczonych od wielu lat. Zupełnie wyjątkowo zdarza się, że uczony taki rzeczywiście ma rację.

O Williamie Proutie można tylko powiedzieć, że był bardzo blisko. Około roku 1815 sformułował jedną ze wspanialszych „prawie słusznych” interpretacji swego stulecia. Zrządzeniem kapryśnego losu odrzucono ją z niewłaściwych powodów. Ten angielski chemik myślał, że znalazł elementarną cząstkę, z której zbudowana jest cała materia. Chodziło mu o atom wodoru.

Trzeba przyznać, że była to piękna, elegancka idea, jeśli nawet „nieco” błędna. Prout dążył do tego, do czego dąży każdy dobry naukowiec - zgodnie z pochodzącą od Greków tradycją, poszukiwał prostoty. Poszukiwał wspólnego czynnika łączącego dwadzieścia pięć znanych wówczas pierwiastków. Szczerze mówiąc, zajęcie to nie było zupełnie zgodne z linią jego dotychczasowych zainteresowań. Do momentu zajęcia się poszukiwaniami a-tomu jego głównym osiągnięciem było napisanie monografii poświęconej moczowi. Prowadził także rozległe badania nad odchodami boa dusicieli. Nawet nie chcę się domyślać, jak stąd doszedł do atomizmu.

Prout wiedział, że wodór z liczbą atomową równą jeden jest najlżejszym ze wszystkich pierwiastków. Być może, mówił, wodór jest pierwotną formą materii, a wszystkie inne pierwiastki stanowią po prostu zlepki wodorów. W duchu starożytnych przodków nazwał tę kwintesencję „protylem”. Koncepcja wydawała się sensowna, bo liczby atomowe większości pierwiastków były bliskie liczbom całkowitym, wielokrotnościami ciężaru wodoru. A to głównie dlatego, że względne ciężary były wtedy zazwyczaj niedokładnie znane z powodu znacznych błędów pomiaru. Gdy poprawiono precyzję pomiarów ciężarów atomowych, hipoteza Prouta została zmiażdżona (z zupełnie niewłaściwych powodów). Stwierdzono, że względny ciężar atomu chloru wynosi 35,5, i to zdyskwalifikowało koncepcję Prouta, bo przecież nie można mieć połowy atomu wodoru. Wiemy dziś, że występujący naturalnie chlor jest mieszaniną dwóch odmian, czyli izotopów. Jeden z nich ma 35 „wodorów”, a drugi 37. Te „wodory” to protony i neutrony mające prawie jednakową masę.

Tak naprawdę Prout mówił o nukleonie (tak nazywamy każdą z cząstek, proton i neutron, które składają się na jądro). Rzeczywiście był już całkiem blisko. Dążenie do stworzenia systemu prostszego niż zestaw około 25 znanych wtedy pierwiastków miało w końcu zostać uwieńczone sukcesem. Jednak jeszcze nie w XIX wieku.

Pasjans z pierwiastkami

Zakończmy naszą karkołomną podróż przez ponad dwieście lat chemii spotkaniem z Dymitrem Mendelejewem (1834-1907), urodzonym na Syberii chemikiem odpowiedzialnym za zestawienie układu okresowego pierwiastków. Tablica stanowiła ogromny krok naprzód w dziedzinie klasyfikacji, a jednocześnie wielki postęp na drodze poszukiwań demokrytejskiego atomu.

Mendelejew wiele przeszedł w życiu. Ten dziwny człowiek - zdaje się, że żywił się wyłącznie zsiadłym mlekiem (wypróbowywał jakąś nową koncepcję medyczną) - był bezlitośnie wykpiwany z powodu ułożenia tablicy. Wytrwale bronił swoich studentów z Uniwersytetu Petersburskiego, a gdy u schyłku kariery poparł ich w czasie jakichś protestów, wyrzucono go z pracy.

Możliwe, że gdyby nie studenci, nigdy nie zestawiłby układu okresowego. Kiedy zatrudniono go w katedrze chemii w 1867 roku, Mendelejew nie mógł znaleźć przyzwoitego podręcznika dla swoich słuchaczy. Sam zabrał się więc do pisania. Widział chemię jako „naukę o masie” - znowu pojawia się ten problem masy - i w podręczniku zawarł prosty pomysł porządkowania pierwiastków w zależności od ciężaru atomowego.

Doszedł do tego układając karty. Na osobnych kartkach zapisał symbole pierwiastków wraz z ich ciężarem atomowym i różnymi innymi własnościami (na przykład: sód - aktywny metal, argon - gaz szlachetny). Lubił pasjanse, postawił więc sobie jeden z pierwiastków. Przesuwał karty tak, aby ułożyć je w porządku wzrastających ciężarów atomowych. Odkrył wtedy pewien „rytm”. Podobne własności chemiczne występowały u pierwiastków znajdujących się na co ósmym miejscu. Na przykład lit, sód i potas są chemicznie aktywnymi metalami, a ich pozycje mają numery 3, 11 i 19. Podobnie wodór (1), fluor (9) i chlor (17) są aktywnymi gazami. Mendelejew ułożył więc karty tak, by leżały w ośmiu pionowych kolumnach zawierających pierwiastki o podobnych własnościach.

Zrobił jeszcze jedną nieortodoksyjną rzecz: nie czuł się zobligowany do wypełnienia wszystkich pustych miejsc. Wiedział, że, tak jak w pasjansie, niektóre potrzebne karty kryją się w talonie. Chciał, by można było odczytywać dane nie tylko ukryte w rzędach, ale i w kolumnach tabeli. Jeśli jakieś miejsce wymagało pierwiastka o konkretnych własnościach, a taki pierwiastek nie był znany, to pozostawiał je puste, zamiast na siłę dopasowywać do niego istniejące pierwiastki. Nawet nadawał nazwy tym antycypowanym pierwiastkom za pomocą przedrostka „eka-” (w sanskrycie *eka* znaczy jeden). Na przykład nazwy eka-glin i eka-krzem otrzymały puste miejsca znajdujące się odpowiednio pod glinem i krzemem.

Te luki w tablicy były jednym z powodów, dla których tak bardzo wyśmiewano Mendelejewa. Ale pięć lat później, w 1875 odkryto gal, który okazał się eka-glinem, ze wszystkimi przewidzianymi przez Mendelejewa własnościami. W 1886 roku odkryto german, który z kolei okazał się eka-krzemem. Ten chemiczny pasjans nie był tak zważany, jak się niektórym zdawało.

Jednym z czynników, który umożliwił powstanie tablicy Mendelejewa, był wzrost dokładności, z jaką chemicy mierzyli ciężar atomowy pierwiastków. Mendelejew sam poprawił wartości przypisywane ciężarom atomowym kilku pierwiastków, co nie przysporzyło mu przyjaciół wśród tych ważnych uczonych, których wyniki zakwestionował.

Aż do odkrycia jądra i kwantowych własności atomu nikt nie rozumiał, skąd brała się regularność obserwowana w układzie okresowym. W rzeczy samej, na początku ogarnęło uczonych zniechęcenie na skutek całego tego układu okresowego. Było ponad pięćdziesiąt substancji, zwanych pierwiastkami, podstawowymi składnikami Wszechświata, które z definicji nie podlegały dalszym podziałom. Oznaczało to 50 rodzajów atomów, a liczba ta wkrótce wzrosła do ponad 90. Daleka droga dzieliła nas wtedy od elementarnych cząstek materii. Uczni patrzący na układ okresowy u schyłku XIX wieku z rozpaczy chyba rwali sobie włosy z głów. Gdzież jest ta prostota i jedność, której poszukiwaliśmy przez ponad dwa tysiące lat? Niemniej porządek, jaki Mendelejew dostrzegł w ogólnym chaosie, zdawał się wskazywać na głębiej ukrytą prostotę. Patrząc retrospektywnie, układ i regularność tablicy okresowej głośno domagały się atomu charakteryzującego się jakimś rodzajem struktury wewnętrznej, o powtarzającej się regularności. Chemicy nie byli jednak jeszcze przygotowani na to, by porzucić koncepcję mówiącą, że ich atomy - wodór, tlen itd. - są niepodzielne. Bardziej skuteczny atak nadszedł z innej strony.

Nie wińmy Mendelejewa za złożoność układu okresowego. On tylko, najlepiej jak potrafił, starał się uporządkować bałagan. Robił to samo, co wszyscy dobrzy uczeni: poszukiwał porządku ukrytego wśród złożoności. Nie doczekał się uznania ze strony kolegów. Nikt mu też nie dał Nagrody Nobla, choć żył jeszcze przez parę lat po jej ufundowaniu. Jedynie jego studenci uhonorowali go najwyższym hołdem, jaki można złożyć nauczycielowi. W 1907 roku grupa studentów uczestniczących w pogrzebie Mendelejewa niosła wysoko nad głowami transparent z układem okresowym. Pozostawił nam po sobie słynną tablicę, którą znaleźć można w każdym laboratorium, w każdej pracowni chemicznej, we wszystkich szkołach świata.

Śledząc ostatni etap zmiennych kolei losu fizyki klasycznej, przeniesiemy się od badań nad materią i cząstkami z powrotem do badań nad siłami. W tym wypadku będzie to elektryczność. W XIX wieku elektryczność traktowano niemal jak samodzielny dziedzinę nauki.

Elektryczność była tajemniczą siłą i, na pierwszy rzut oka, wydawało się, że nie występuje w przyrodzie, jeśli nie liczyć przerażających błyskawic. Dlatego też badacze musieli uciekać się do „nienaturalnych” sztuczek, by studiować elektryczność. Musieli „wyprodukować” zjawisko, by móc je zbadać. My już zdajemy sobie sprawę z wszechobecności elektryczności. Cała materia jest z natury swej elektryczna. Proszę to mieć na uwadze, gdy dojdziemy do czasów współczesnych, gdzie będziemy omawiać egzotyczne cząstki „produkowane” w akceleratorach. W XIX wieku elektryczność była tak samo egzotyczna, jak obecnie kwarki. Dziś elektryczność towarzyszy nam na każdym kroku, co stanowi jeszcze jeden dowód na to, jak dalece ludzie potrafili modyfikować swoje środowisko.

W tym wczesnym okresie było wielu bohaterów elektryczności i magnetyzmu. Niektórzy pozostawili swoje nazwisko rozmaitym jednostkom miar fizycznych. Należy do nich Charles Augustin de Coulomb (jednostka ładunku elektrycznego), André Marie Ampère (natężenie prądu), Georg Ohm (opór elektryczny), James Watt (moc) i James Joule (praca, energia i ilość ciepła). Luigi Galvani dał nam galwanomierz, urządzenie do mierzenia prądu, a Alessandro Volta - wolt, jednostkę napięcia elektrycznego. Podobnie Carl Friedrich Gauss, Hans Christian Oersted i Wilhelm Weber odcisnęli swoje piętno i ich nazwiskami oznaczono wielkości elektryczne wprowadzone tylko po to, by wzbudzać

przerażenie i nienawiść u studentów inżynierii elektrycznej. Jedyne Benjamin Franklin, pomimo znacznych zasług, nie zdołał się uwiecznić w żadnej jednostce. Biedny Ben! No cóż, na pocieszenie ma portret na studolarowych banknotach.

Franklin zauważył, że są dwa rodzaje elektryczności. Mógł jeden z nich nazwać Joe, a drugi Moe, ale zamiast tego zdecydował się na plus (+) i minus (-). To Franklin nazwał „ładunkiem elektrycznym” ilość elektryczności, powiedzmy ujemnej, zgromadzonej na jakimś obiekcie. Wprowadził też pojęcie zachowania ładunku, mówiące, że jeśli elektryczność przenoszona jest z jednego ciała na drugie, to całkowity ładunek musi w sumie dawać zero. Jednak wśród tych wszystkich uczonych prawdziwymi gigantami byli dwaj Anglicy: Michael Faraday i James Clerk Maxwell.

Elektryczne żaby

Nasza historia zaczyna się u schyłku XVIII wieku, gdy Galvani skonstruował ogniwo. Wynalazek ten został potem usprawniony przez innego Włocha, Alessandra Voltę. Badania żabich odruchów, którymi zajmował się Galvani - wywieszał na kracie okiennej spreparowane żabie mięśnie i obserwował, jak podlegają skurczom podczas burzy - dowiodły istnienia „zwierzęcej elektryczności”. Zainspirowało to Voltę i bardzo dobrze się stało. Wyobraźmy sobie Henry'ego Forda instalującego w każdym ze zbudowanych w jego fabryce samochodów pudełko z żabami, opatrzone instrukcją: „Żaby należy karmić co 25 kilometrów”. To Volta odkrył, że żabia elektryczność miała coś wspólnego z obecnością dwóch rodzajów metalu połączonych żabim ściernem. Żaby Galvaniego wisiały na mosiężnych haczykach na żelaznej kracie. Volta wypróbowywał różne pary metali i wkrótce zdołał doprowadzić do przepływu prądu elektrycznego nawet bez udziału żab: zamiast nich stosował kawałki skóry namoczone w solance. Potem ustawił „stos” płytek cynkowych na przemian z miedzianymi, gdyż zdał sobie sprawę, że im większy stos, tym większy prąd płynął przez podłączony do niego obwód. Kluczowym momentem działalności Volty było wynalezienie elektrometru - urządzenia służącego do pomiaru prądu. Badania te przyniosły dwa bardzo ważne rezultaty: narzędzie laboratoryjne służące do wytwarzania prądu i świadomość, że elektryczność może być wynikiem reakcji chemicznych.

Innym ważnym osiągnięciem był dokonany przez Coulomba pomiar natężenia i charakteru oddziaływań elektrycznych, występujących między dwoma naładowanymi kulkami. Aby przeprowadzić te badania, wynalazł on wagę skręceń - urządzenie nadzwyczaj wrażliwe, nawet na maleńkie siły. Za pomocą tej wagi Coulomb wykazał, że siła oddziaływania elektrycznego między ładunkami jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu dzielącej je odległości. Odkrył także, że ładunki jednoimienne się odpychają (+ + lub - -), a różnoimienne się przyciągają (+ -). Prawo Coulomba określające wartość F dla ładunków elektrycznych odegra kluczową rolę w zdobywaniu wiedzy o atomie.

Nastąpił okres bardzo gorączkowej aktywności; przeprowadzono wiele eksperymentów z elektrycznością i magnetyzmem - uważanych przez badaczy w tamtym okresie za osobne zjawiska. W ciągu krótkiego okresu około 50 lat (1820-1870) eksperymenty te doprowadziły do sformułowania wielkiej syntezy, której rezultatem była teoria obejmująca nie tylko elektryczność i magnetyzm, ale także i światło.

Tajemnica wiązania chemicznego: znowu cząstki

Znaczna część naszej początkowej wiedzy o elektryczności wyłoniła się w wyniku odkryć dokonywanych w dziedzinie chemii, a zwłaszcza w jej dziale, zwanym dziś elektrochemią. Dzięki baterii Volty dowiedzieliśmy się, że prąd elektryczny może płynąć przez obwód, czyli przewód spinający bieguny baterii. Gdy obwód zostanie przerwany w ten sposób, że do końców przewodów dołączone są kawałki metali zanurzone w cieczy, prąd płynie przez ciecz. Prąd płynący w cieczy powoduje zachodzenie procesu chemicznego: rozkładu. Jeśli cieczą tą jest woda, to w pobliżu jednego kawałka metalu gromadzi się gazowy wodór, przy drugim zaś - tlen. Gazy te pojawiają się zawsze w proporcji dwie części wodoru na jedną część tlenu, z czego wynika, że woda ulega rozkładowi na swe podstawowe składniki. Natomiast jeśli przepuszcza się prąd przez roztwór chlorku sodu, sól osadza się na jednej elektrodzie, a przy drugiej pojawia się zielonkawy gaz - chlor. W niedługim czasie rozwinęła się cała gałąź przemysłu, zwana galwanotechniką.

Rozkład związków chemicznych zachodzący pod wpływem prądu elektrycznego wskazywał na bardzo istotny fakt: na związek między siłami elektrycznymi a wiązaniem atomowym. Rozpowszechniła się koncepcja, mówiąca, że siły, które wiążą atomy - to znaczy powinowactwo łączące jedną substancję z drugą - są siłami natury elektrycznej.

Michael Faraday rozpoczął swą działalność od uporządkowania nazewnictwa. Było to, podobnie jak praca Lavoisiera, bardzo pożyteczne działanie. Faraday nazwał elektrodami kawałki metali zanurzonych w cieczy. Ujemną elektrodę mianował katodą, a dodatnią - anodą. Prąd płynący w cieczy powodował przemieszczanie się naładowanych atomów od katody do anody. W normalnych warunkach atomy chemiczne są neutralne, nie mają żadnego - ani dodatniego, ani ujemnego - ładunku, ale prąd elektryczny łądował je w jakiś sposób. Faraday nazwał takie naładowane atomy jonami. Dziś wiemy, że jon to jest atom, który został naładowany na skutek straty lub przyłączenia jednego lub więcej elektronów. W czasach Faradaya nie wiedzano nic na temat elektronów, nie zdawano też sobie sprawy, czym jest elektryczność; ale czy Faraday nie podejrzewał istnienia elektronów? W latach trzydziestych XIX wieku przeprowadził serię spektakularnych eksperymentów, których rezultatem są dwa proste twierdzenia, znane dziś jako prawa elektrolizy Faradaya:

1. Masa substancji chemicznej wydzielonej na elektrodzie jest wprost proporcjonalna do iloczynu natężenia i czasu przepływu prądu. Innymi słowy, masa uwolnionej substancji jest proporcjonalna do ilości elektryczności przepływającej przez ciecz.
2. Masa uwolniona przez ustaloną ilość elektryczności jest proporcjonalna do ciężaru atomowego tej substancji pomnożonego przez liczbę atomów składających się na cząsteczkę związku.

Z praw tych wynika, że elektryczność nie jest ciągła, lecz może być podzielona na porcje. Jeśli przyjmiemy koncepcję atomów Daltona, prawa Faradaya mówią nam, że atomy w cieczy (jony) przemieszczają się do elektrody, gdzie każdy z nich otrzymuje pewną ilość elektryczności, która przeobraża go w zwykły atom wodoru, tlenu czy cze-
gokolwiek innego. Z praw Faradaya wynika nieunikniony wniosek: elektryczność występuje w postaci cząstek. Jednak dopiero 60 lat później, pod koniec stulecia, wniosek ten doczekał się potwierdzenia w postaci odkrycia elektronu.

Szok w Kopenhadze

Aby dalej śledzić historię elektryczności - tego czegoś, co za pewną cenę wyłania się z dwóch czy trzech otworów gniazdek tkwiących w ścianach - musimy udać się do Kopenhagi. W 1820 roku Hans Christian Oersted dokonał doniosłego odkrycia; niektórzy historycy twierdzą, że było to najdonioślejsze z doniosłych odkryć w tej dziedzinie. Oersted otrzymał prąd w tradycyjny sposób: połączył przewodem jeden biegun baterii Volty z drugim. Elektryczność wciąż kryła tajemnice, ale wiadomo było, że prąd elektryczny brał się z czegoś, zwanego ładunkiem elektrycznym, przemieszczającego się wzdłuż przewodu. Nie było w tym nic nowego, dopóki Oersted nie umieścił igły kompasu (magnesu) w pobliżu obwodu. Gdy prąd płynął w obwodzie, igła odchyliła się od normalnego położenia wyznaczonego przez biegun północny i przyjmowała dziwaczną pozycję pod kątem prostym do obwodu. Oersted najpierw się tym zmartwił, aż wreszcie zaświtało mu, że przecież kompas służy do tego, by wykrywać pole magnetyczne! A zatem zachowanie igły świadczy o tym, że prąd płynący w obwodzie musi wytwarzać pole magnetyczne, czyż nie? Oersted odkrył związek między elektrycznością i magnetyzmem: prąd elektryczny wytwarza pole magnetyczne. Magnesy, oczywiście, także wytwarzają pole magnetyczne i ich zdolność do przyciągania kawałków żelaza (albo przytwierdzania zdjęć do drzwi lodówek) była dobrze znana. Wiadomość o odkryciu obiegała Europę i wywołała wielkie poruszenie.

Wykorzystując tę informację paryżanin André Marie Ampère znalazł matematyczny wzór opisujący zależności między prądem a polem magnetycznym. Wielkość i kierunek pola zależą od prądu i od kształtu (prostego, kołowego czy jakiegokolwiek innego) przewodu, w którym płynie prąd. Łącząc rozumowanie matematyczne z wynikami wielu pospiesznie przeprowadzonych eksperymentów, Ampère rozpętał burzę kontrowersji, z której w odpowiednim czasie wyłonił się przepis pozwalający na obliczanie pola magnetycznego wytwarzanego przez prąd płynący w dowolnie ukształtowanym obwodzie - prostym, zakrzywionym, kołowym czy gęsto nawiniętym na cylindryczną formę. Skoro prąd przepuszczony przez dwa proste przewody wytwarza dwa pola magnetyczne, które mogą na siebie oddziaływać, to wynika z tego, że przewody wywierają na siebie nawzajem pewną siłę. To odkrycie umożliwiło Faradayowi dokonanie kolejnego ważnego wynalazku - silnika elektrycznego. Fakt, że kołowa pętla, w której płynie prąd, wytwarza pole magnetyczne, miał też inne głębokie implikacje. Czy możliwe, że to, co starożytni nazywali magnetytami, naturalnymi magnesami, mogło być zbudowane z kolistych obwodów elektrycznych w skali atomowej? Był to kolejny fakt wskazujący na elektryczną naturę atomów.

Oersteda, podobnie jak wielu innych uczonych, pociągała unifikacja, redukcja i tendencja do upraszczania. Wierzył, że grawitacja, elektryczność i magnetyzm to różne przejawy tej samej siły, i dlatego właśnie jego odkrycie bezpośredniego związku łączącego dwa rodzaje oddziaływań było tak bardzo podniecające (szokujące?). Ampère także dążył do prostoty i nawet próbował wyeliminować magnetyzm, traktując go jako przejaw elektryczności będącej w ruchu (elektrodynamicznej).

Znowu déjř vu

I teraz wkracza na scenę Michael Faraday (1791-1867). (No dobrze, już przedtem wkroczył, ale teraz właśnie następuje formalne wprowadzenie. Fanfary proszę!). Jeśli Faraday nie był największym eksperymentatorem swoich czasów, to z całą pewnością pretenduje do tego tytułu. Mówi się, że powstało więcej jego biografii niż Newtona, Einsteina czy Marilyn Monroe. Dlaczego? Częściowo z tego powodu, że jego kariera przypomina nieco karierę Kopciuszka. Urodzony w ubóstwie, często głodny (kiedyś jeden bochenek chleba był jego jedynym pożywieniem przez cały tydzień), Faraday praktycznie nie miał żadnego wykształcenia, ale za to solidne religijne wychowanie. Gdy miał 14 lat, został pomocnikiem u introligatora. Tam właśnie udało mu się przeczytać niektóre z książek oddanych do oprawy. W ten sposób jednocześnie zdobywał wykształcenie i trenował swe zdolności manualne, które później tak bardzo mu się przydały, gdy został już eksperymentatorem. Pewnego dnia ktoś przyniósł do oprawienia trzecie wydanie *Encyclopaedia Britannica*. Znajdował się tam artykuł poświęcony elektryczności. Faraday przeczytał go, uległ fascynacji i świat się zmienił.

Wyobraźmy sobie taką sytuację: do biur agencji informacyjnych docierają równocześnie dwie informacje:

FARADAY ODKRYWA ELEKTRYCZNOŚĆ,
KRÓLEWSKIE TOWARZYSTWO NAUKOWE
PODZIWIWA OSIĄGNIĘCIE

oraz

NAPOLEON UCIEKA ZE ŚWIĘTEJ HELENY,
ARMIE KONTYNENTALNE MASZERUJĄ.

Która z nich pojawiła się w wieczornych „Wiadomościach”? Jasne, że ta o Napoleonie, ale w ciągu następnych 50 lat odkrycie Faradaya dosłownie zelektryzowało Anglię i uruchomiło proces daleko idących zmian w świadomości oraz w sposobie życia ludzi na naszej planecie. I chyba nigdy przedtem ani potem podobnie radykalne zmiany nie nastąpiły na skutek wynalazku dokonanego przez jednego człowieka. Gdybyż tylko ci, którzy decydują o zawartości telewizyjnych programów publicystycznych, stykali się podczas studiów z prawdziwą nauką...

Świece, silniki, dynama

Oto, co Michael Faraday działał: mając 21 lat zaczął profesjonalną działalność jako chemik i odkrył kilka związków organicznych, między innymi benzen. Po czym zajął się fizyką, po drodze porządkując elektrochemię. (Gdyby fizycy z Uniwersytetu Stanu Utah, którzy w 1989 roku myśleli, że odkryli reakcje termojądrowe zachodzące w temperaturze pokojowej, lepiej rozumieli prawa elektrolizy Faradaya, zaoszczędziliby sobie i nam nieco wstydu). Potem Faraday zaczął dokonywać wielkich odkryć dotyczących elektryczności i magnetyzmu:

- odkrył prawo indukcji (nazwane jego nazwiskiem), według którego zmienne pole magnetyczne wytwarza pole elektryczne;
- jako pierwszy uzyskał prąd elektryczny za pomocą pola magnetycznego;
- wynalazł silnik elektryczny i dynamo;

- wykazał związek między elektrycznością i wiązaniami chemicznymi;
- odkrył wpływ magnetyzmu na światło;
- i znacznie więcej!

A wszystko to bez tytułów doktora, magistra, bakałarza czy choćby matury. Był matematycznym analfabetą. Swoje odkrycia notował w formie opisowej, prostym językiem, często ilustrując tekst rysunkami objaśniającymi.

W roku 1990 Uniwersytet w Chicago zainicjował serię programów telewizyjnych zatytułowanych *Wykłady świąteczne* i mnie przypadł w udziale zaszczyt wygłoszenia pierwszego z nich. Nazwałem go *Świeca i Wszechświat*. Tytuł ten zapożyczyłem od Faradaya, który w roku 1826 wygłaszał pierwsze *Wykłady świąteczne* dla dzieci. Twierdził wtedy, że w płomieniu świecy można odnaleźć wszystkie znane nam procesy fizyczne. Było to prawdą w 1826 roku, ale nie w 1990, kiedy wiemy już sporo o procesach, które nie zachodzą w płonącej świecy, gdyż panująca tam temperatura jest zbyt niska. Niemniej wykłady Faradaya były błyskotliwe oraz zajmujące i znakomicie nadałyby się na prezent gwiazdkowy dla Twoich dzieci, drogi Czytelniku, gdyby tylko jakiś aktor o aksamitnym głosie nagrał je na płytę kompaktową. Dodajmy więc kolejny rys do portretu tego niezwykłego człowieka - Faraday jako popularyzator.

Omówiliśmy już jego badania nad zjawiskiem elektrolizy, które przygotowały teren dla odkrycia elektrycznej natury atomów chemicznych, a także samych elektronów. Teraz chciałbym opowiedzieć o dwóch najważniejszych osiągnięciach Faradaya: o indukcji elektromagnetycznej i jego niemal mistycznej koncepcji „pola”.

Droga wiodąca do współczesnego rozumienia elektryczności (a właściwie elektromagnetyzmu czy też pola elektromagnetycznego) przypomina słynną podwójną zagrywkę baseballową: Tinker do Eversa do Chance'a. W tym przypadku mamy: Oersted do Ampère'a do Faradaya. Oersted i Ampère jako pierwsi gromadzili wiedzę na temat prądu elektrycznego i pola magnetycznego. Prąd elektryczny płynący w przewodach, takich jak te, które znajdują się w każdym domu, wytwarza pole magnetyczne. Dlatego też, odpowiednio manipulując prądem, można zrobić magnes o dowolnej sile - od napędzanego prądem z kieszonkowej baterijki małego magnesu poruszającego wiatraczek do ogromnych magnesów stosowanych w akceleratorach. Ta wiedza na temat elektromagnesów pozwala nam przypuszczać, że naturalne magnesy zawierają jakieś elementy obwodów elektrycznych w atomowej skali, które współdziałając wytwarzają magnes. Substancje, które nie wykazują własności magnetycznych, także zawierają takie obwody, tylko że są one ułożone chaotycznie - nie powstaje wokół nich żadne wypadkowe pole magnetyczne.

Faraday bardzo długo próbował połączyć elektryczność i magnetyzm. Jeśli elektryczność może wytwarzać pole magnetyczne, zastanawiał się, to czy magnesy mogą produkować elektryczność? Czemu nie? Przyroda uwielbia symetrię. Ale potrzebował ponad dziesięć lat (od 1820 do 1831 roku) na udowodnienie, że jest to możliwe. To było prawdopodobnie największe jego odkrycie.

Jest ono znane pod nazwą indukcji elektromagnetycznej, a symetria, której Faraday poszukiwał, przybrała zaskakującą postać. Faraday najpierw zastanawiał się, czy magnes może spowodować ruch przewodu, w którym płynie prąd. Wyobrażając sobie działające siły, sporządził urządzenie, składające się z przewodu, którego jeden koniec przyłączył do baterii; drugi zanurzył w zlewce z rtęcią. Koniec ten wisiał tak, że mógł swobodnie krążyć wokół żelaznego magnesu umieszczonego w zlewce. Gdy prąd po-

płynął, przewód zaczął poruszać się wokół magnesu. Ten dziwny wynalazek znamy dziś pod nazwą silnika elektrycznego. Faraday przekształcił elektryczność w ruch zdolny do wykonywania pracy.

Przenieśmy się do roku 1831 i przyjrzyjmy się innemu wynalazkowi. Faraday nawinął wiele zwojów drutu miedzianego po jednej stronie obwarzanka wykonanego z miękkiego żelaza i podłączył oba końce zwoju do wrażliwego urządzenia mierzącego prąd, zwanego galwanometrem. Podobny kawałek drutu nawinął po przeciwnej stronie obwarzanka, a końce przyłączył do baterii, tak aby prąd popłynął przez ten zwoj. Dziś takie urządzenie nazywamy transformatorem. Powtórzmy: mamy dwa zwoje nawinięte po przeciwnych stronach obwarzanka. Jeden, nazwijmy go A, jest podłączony do baterii, drugi (B) do galwanometru. Co się stanie, gdy włączymy prąd?

Odpowiedź jest bardzo ważna dla historii nauki. Prąd płynący w zwoju A wytwarza pole magnetyczne. Faraday sądził, że pole to powinno wywołać przepływ prądu w zwoju B, ale zamiast tego zauważył dziwne zjawisko. Gdy włączył prąd, wskazówka galwanometru podłączonego do zwoju B odchyłała się - *voilà!* elektryczność! - ale tylko na moment. Po nagłym skoku wracała na swoje miejsce przy zerze i uparcie tam tkwiła. Gdy Faraday odłączał baterię, wskazówka znów na chwilę odchyłała się w przeciwnym kierunku. Poprawianie czułości galwanometru nie przyniosło żadnego efektu. Zwiększanie liczby zwojów nie przyniosło żadnego efektu. Podłączanie silniejszych baterii nie przyniosło żadnego efektu. Aż wreszcie - heureka! (w Anglii wołają wtedy: na Jowisza!) - Faraday zdał sobie sprawę, że prąd w pierwszym zwoju faktycznie wywoływał przepływ prądu w drugim, ale tylko wtedy, gdy się zmieniał. Tak więc odkrył, że zmienne pole magnetyczne wytwarza pole elektryczne, co potwierdziło się w ciągu następnych trzydziestu lat badań.

Zjawisko to znajduje zastosowanie w generatorze prądu. Obracający się magnes wytwarza nieustannie zmieniające się pole magnetyczne, które z kolei wytwarza pole elektryczne i jeśli umieści się w tym polu obwód, popłynie w nim prąd. Magnes można poruszać kręcąc korbą, za pomocą wodospadu albo turbiny parowej. Znaleźliśmy więc sposób wytwarzania prądu elektrycznego, by zamienić noc w dzień i zasilić energią wszystkie gniazdka elektryczne w domach i fabrykach.

Ale my, poszukiwacze czystej wiedzy... tropimy a-tom i Boską Cząstkę; rozwodzimy się nad techniką tylko dlatego, że bardzo trudno byłoby zbudować akcelerator bez pomocy elektryczności. Jeśli zaś chodzi o Faradaya, to elektryfikacja świata tylko o tyle zrobiłaby na nim wrażenie, że teraz mógłby pracować także w nocy.

Faraday sam zbudował pierwszy ręczny generator na korbę, który nazwano dynamem. Ale był zbyt zajęty „odkrywaniem nowych faktów [...] w przekonaniu, że [zastosowania praktyczne] potem się pojawiają”, by zastanawiać się, do czego takie dynamo mogłoby się przydać. Często powtarzana anegdota głosi, że gdy premier brytyjski odwiedził w 1832 roku laboratorium Faradaya, wskazał na dziwaczne urządzenie i zapytał, do czego ono służy. „Nie wiem, ale idę o zakład, że kiedyś pański rząd obłoży je podatkiem” - powiedział Faraday. Podatek od wytwarzania elektryczności wprowadzono w Anglii w 1880 roku.

Niech pole będzie z tobą

Głównym teoretycznym osiągnięciem Faradaya, kluczowym dla naszej historii redukcjonizmu, było pojęcie pola. By się do niego przygotować, musimy powrócić na chwilę do Rudjera Boškovića, który na 70 lat przed Faradayem opublikował radykalną hipotezę, posuwając koncepcję atomu o duży krok naprzód. „Jak się zderzają a-tomy?” - pytał. Kule bilardowe podczas zderzeń ulegają deformacji. Dzięki sprężystości odskakują od siebie. Ale a-tomy? Czy można wyobrazić sobie zdeformowany a-tom? Co miałyby się deformować? Co powracać do pierwotnego stanu? Rozumując w ten sposób, Bošković zredukował a-tomy do pozbawionych wymiarów i struktury punktów matematycznych. Punkt taki byłby źródłem sił - przyciągania i odpychania. Bošković skonstruował szczegółowy model geometryczny, który zupełnie sensownie opisywał zderzenia atomów. Punktowy a-tom robił to wszystko, co i twardy, masywny atom Newtona, ale miał nad nim pewną przewagę. Choć nie miał rozmiarów przestrzennych, był obdarzony bezwładnością (masą). A-tom Boškovića sięgał w przestrzeń za pośrednictwem promieniujących z niego sił. To jest bardzo przewidujące ujęcie zagadnienia. Faraday też uważał, że a-tomy są punktami, ale ponieważ nie potrafił przedstawić na to żadnego dowodu, jego poparcie było raczej nieme. Poglądy Boškovića/Faradaya przedstawiały się następująco: materia składa się z punktowych a-tomów otoczonych siłami. Newton twierdził, że siła oddziałuje na masę, a zatem powyższy pogląd wyraźnie stanowił rozwinięcie jego koncepcji. Jak się ta siła przejawia?

„A teraz proponuję zabawę - mówię do studentów zgromadzonych w auli. - Gdy twój sąsiad siedzący po lewej stronie opuści rękę, ty podnieś i opuść swoją”. Na końcu każdego rzędu przekazujemy sygnał o jeden rząd wyżej i zmieniamy instrukcję na: „sąsiad siedzący po prawej stronie”. Jako pierwsza podnosi rękę studentka siedząca na lewym krańcu pierwszego rzędu. Wkrótce fala w postaci „ręka w górze” przesuwa się w poprzek sali, do góry, znowu w poprzek i tak dalej, aż zamiera na końcu ostatniego rzędu. Otrzymaliśmy w ten sposób zaburzenie przemieszczające się z pewną prędkością w ośrodku studentów. Ta sama zasada rządzi falą kibiców, którą można zaobserwować na stadionach całego świata. Fala na wodzie ma takie same własności. Choć zaburzenie się przemieszcza, cząstki wody pozostają w miejscu, podskakując w górę i w dół, ale nie uczestnicząc w poziomej prędkości rozchodzenia się zaburzenia. Wysokość fali jest zaburzeniem, woda jest ośrodkiem. Prędkość rozprzestrzeniania się zaburzenia zależy od własności ośrodka. Dźwięk rozchodzi się w powietrzu mniej więcej w ten sam sposób. Ale jak siła sięga od jednego atomu do drugiego poprzez oddzielającą je pustą przestrzeń? Newton w ogóle nie podjął tego zagadnienia. „Nie tworzę hipotez” - powiedział. Sformułowana czy nie, powszechnie panująca koncepcja dotycząca rozchodzenia się sił mówiła o tajemniczym „oddziaływaniu-na-odległość”. Do tego pojęcia odwoływano się, próbując zrozumieć działanie grawitacji.

Faraday wprowadził pojęcie pola - zdolności przestrzeni do ulegania zaburzeniom, wywołanym przez znajdujące się gdzieś źródło. Najpospolitszym przykładem jest magnes sięgający do żelaznych gwoździ. Faraday wyobrażał sobie, że przestrzeń wokół magnesu czy zwoju cewki jest „naprężona” z powodu istnienia źródła. Pojęcie pola rodziło się w bólach przez wiele lat i w wielu publikacjach. Teraz historycy bardzo lubią spierać się o to, jak, co i kiedy się pojawiło. Oto notatka Faradaya z 1832 roku: „Gdy magnes oddziałuje na odległy magnes lub kawałek żelaza, oddziaływanie to [...] postępuje stopniowo od ciał magnetycznych i *potrzeba pewnego czasu, aby się przemieściło*” [podkreślenie moje]. Tak więc pojawiła się koncepcja, według której zaburzenie - na przykład pole magnetyczne o natężeniu 0,1 tesla - może podróżować w przestrzeni i powiadomić opilek żelaza o swojej obecności oraz wyrzucić siłę. To jest właśnie to, co

robi silna fala wody z nieostrożnym pływakiem. Fala wody - przypuśćmy, że jest to fala o wysokości metra - wymaga wody, by się w niej mogła rozprzestrzeniać. Wciąż jeszcze zmagamy się z pytaniem, czego potrzebuje pole magnetyczne. Wrócimy do tego.

Linie sił pola magnetycznego ujawniają się w popularnym doświadczeniu, które zapewne robiłeś kiedyś w szkole, drogi Czytelniku: trzeba naprószyć na kartkę nieco opiłków żelaznych, kartkę umieścić nad magnesem; teraz wystarczy lekko trącić kartkę, by przewyciężyć tarcie, a opiłki zgromadzą się w pewnych miejscach, tworząc wyraźny wzór linii łączących bieguny magnesu. Faraday myślał, że te linie były rzeczywistym przejawem stworzonego przez niego pojęcia pola. Ale dla nas istotne są nie tyle wieloznaczne opisy mechanizmu, mającego zastąpić oddziaływanie-na-odległość, ale to, jak wprowadzone przez Faradaya pojęcie zostało użyte i zmodyfikowane przez naszego następnego elektryka, Szkota Jamesa Clerka Maxwella (1831-1879).

Zanim jednak rozstaniemy się z Faradayem, powinniśmy wyjaśnić jego postawę wobec atomów. Pozostawił nam dwa cytaty jak perełki. Pochodzą one z roku 1839:

„Choć zupełnie nie wiemy, czym jest atom, nie możemy się powstrzymać przed stworzeniem pojęcia maleńkiej cząstki, które reprezentowałoby ją wobec umysłu - istnieje bardzo wiele faktów usprawiedliwiających naszą wiarę w to, że atomy materii są w jakiś sposób związane z siłami elektrycznymi, którym zawdzięczają najbardziej uderzające ze swych własności, między innymi powinowactwo chemiczne [przyciąganie między dwoma atomami]”.

Oraz:

„Muszę przyznać, że jestem zazdrosny o termin atom, bo choć bardzo łatwo jest mówić o atomach, to trudno jest ukształtować sobie jasne wyobrażenie na temat ich natury, gdy weźmie się pod uwagę ciała złożone”.

Cytując te zdania w swej książce zatytułowanej *Inward Bound*, Abraham Pais konkluduje: „Oto jest prawdziwy Faraday, wyborny eksperymentator, który akceptuje wyłącznie to, w co zmuszony jest uwierzyć w wyniku eksperymentu”.

Z prędkością światła

Jeśli pierwsza zagrywka wyglądała tak: Oersted do Ampère'a do Faradaya, następna przedstawia się następująco: Faraday do Maxwella do Hertza. Choć wynalazca Faraday zmienił oblicze świata, to interpretacje, jakie proponował, nie miały same w sobie zbyt wielkiej wartości i utknęłyby w jakimś ślepym zaułku, gdyby nie synteza, którą stworzył Maxwell. Faraday dostarczył Maxwellowi na wpół wyartykułowane (to znaczy: nie wyrażone matematycznie) intuicje. Relacja łącząca Faradaya z Maxwellem przypomina tę między Keplerem i Brahem. Linie sił pola magnetycznego, o których mówił Faraday, stanowiły odskocznnię do pojęcia pola siły, a jego nadzwyczajna uwaga wyrażona w roku 1832, że oddziaływanie elektromagnetyczne nie przenosi się w sposób natychmiastowy, lecz wymaga wyraźnie określonego czasu, odegrała bardzo ważną rolę w wielkim odkryciu Maxwella.

Sam Maxwell dużą część zasługi przypisywał Faradayowi, podziwiał nawet jego analfabetyzm matematyczny, gdyż dzięki niemu wyrażał on swe idee w „naturalnym, nietechnicznym języku”. Maxwell twierdził, że kierował się głównie chęcią przetłumacze-

nia poglądów Faradaya dotyczących elektryczności i magnetyzmu na język matematyki. Ale traktat, który powstał, wykraczał daleko poza Faradaya.

Ukazujące się w latach 1860-1865 publikacje Maxwella - wzorce zawieszistej, trudnej, skomplikowanej matematyki (fuj!) - stanowiły zwieńczenie elektrycznego okresu w historii nauki, który rozpoczął się w zamierzchłych czasach znalezieniem bursztynu i magnetytu. W tej ostatecznej formie Maxwell nie tylko dał Faradayowi matematyczny podkład muzyczny (co prawda był to podkład atonalny), ale przy okazji udowodnił istnienie fal elektromagnetycznych, przemieszczających się w przestrzeni ze skończoną prędkością (zgodnie z przewidywaniem Faradaya). Miało to wielkie znaczenie, gdyż wielu współczesnych Faradayowi i Maxwellowi uważało, że siły przekazywane są natychmiastowo. Maxwell określił, jak miałyby działać faradayowskie pole. Faraday wykazał eksperymentalnie, że zmienne pole magnetyczne wytwarza pole elektryczne. Poszukując symetrii i wzajemnej zgodności w równaniach, Maxwell zaproponował sytuację odwrotną: zmienne pole elektryczne wytwarza pole magnetyczne. W ten sposób eksplodowały w równaniach - w notesie Maxwella - pola elektryczne i magnetyczne o zmiennych natężeniach, które - wciąż na papierze - wyruszyły w przestrzeń, oddalając się od swych źródeł z prędkością zależną od rozmaitych wielkości elektrycznych i magnetycznych.

W równaniach tych tkwiła pewna niespodzianka. Była w nich ukryta faktyczna prędkość rozprzestrzeniania się fal elektromagnetycznych, której nie przewidywał Faraday. Podanie tej prędkości było jedną z poważniejszych zasług Maxwella. Ślęczał długo nad swymi równaniami i po podstawieniu rozmaitych eksperymentalnych danych wyszło mu, że prędkość ta wynosi 3×10^8 m/s. *Gor luv a duck!* - zawołał, albo coś innego, co wołają zaskoczeni Szkoci, bo 3×10^8 m/s to prędkość, z jaką rozchodzi się światło (prędkość tę po raz pierwszy zmierzono parę lat wcześniej). Jak dowiedzieliśmy się od Newtona przy okazji rozpatrywania zagadki dwóch rodzajów mas, w nauce niewiele jest prawdziwych zbiegów okoliczności. Maxwell stwierdził, że światło jest po prostu jedną z postaci fali elektromagnetycznej. Elektryczność nie musi być uwięziona w przewodach; może rozchodzić się w przestrzeni tak jak światło. „Nie możemy nie wyciągnąć wniosku - pisał Maxwell - że światło składa się z fal poprzecznych tego samego ośrodka, który jest przyczyną zjawisk elektrycznych i magnetycznych”. Maxwell zasugerował możliwość doświadczalnego zweryfikowania tej teorii poprzez wytworzenie fal elektromagnetycznych. Pomysł ten pochwylił Heinrich Hertz. Wielka grupa wynalazców - wśród nich znalazł się Guglielmo Marconi - zajęła się tworzeniem drugiej „fali” elektromagnetycznej technologii. Jej owocami są: radio, radar, telewizja, mikrofały i laserowa komunikacja.

Oto na czym rzecz polega: rozważmy elektron w stanie spoczynku. Z powodu ładunku elektrycznego, którym jest obdarzony, zewsząd otacza go pole elektryczne. Jest ono silniejsze w pobliżu elektronu, a słabsze w oddali. Pole elektryczne „wskazuje”, gdzie tkwi elektron. Skąd wiemy o istnieniu tego pola? To proste: umieścimy dodatni ładunek elektryczny gdziekolwiek w przestrzeni, a odczuje on siłę przyciągającą go do elektronu. Zmusimy teraz elektron do poruszania się w przewodzie. Wydarzą się dwie rzeczy. Pole elektryczne wokół niego zmieni się nie natychmiast, lecz wtedy, gdy tylko informacja o ruchu dotrze do punktu w przestrzeni, w którym dokonujemy pomiaru. Ponadto poruszający się ładunek tworzy przecież prąd elektryczny, powstanie więc pole magnetyczne.

Teraz przyłożmy do elektronu (i jego licznych towarzyszy) siłę w ten sposób, aby regularnie podskakiwał w przewodzie w górę i w dół. Powstałe zmiany pola elektrycz-

nego rozprzestrzeniają się ze skończoną prędkością - z prędkością światła. To właśnie jest fala elektromagnetyczna. Przewód, w którym drgają elektrony, często nazywa się anteną, a siłę, która je napędza - sygnałem częstotliwości radiowej. W ten sposób sygnał zawierający dowolną informację rozchodzi się z prędkością światła. Gdy dociera do drugiej anteny, znajduje tam mnóstwo elektronów; zmusza je do drgań, wywołując oscylujący prąd, który można wykryć i przetworzyć na informacje wizualne czy akustyczne.

Pomimo tego monumentalnego odkrycia, Maxwell nie zrobił błyskotliwej kariery. Zobaczmy, co niektórzy krytycy mieli do powiedzenia o traktacie Maxwella:

- „Z lekka obrzydliwa koncepcja” - sir Richard Glazebrook.
- „Zakłopotanie, a nawet podejrzliwość przemieszane są z podziwem...” - Henri Poincaré .
- „Nie przyjął się w Niemczech i pozostał prawie zupełnie bez echa” - Max Planck.
- „Mogę o tym powiedzieć jedno [o elektromagnetycznej teorii światła]. Myślę, że jest nie do przyjęcia” - lord Kelvin.

Trudno zostać supergwiazdą z takimi recenzjami. Trzeba było eksperymentatora, by uczynić z Maxwella legendę, ale już nie za jego życia, gdyż umarł mniej więcej o dziesięć lat za wcześnie.

Hertz na ratunek

Prawdziwym bohaterem (przynajmniej w oczach piszącego te słowa stroniczego badacza historii) jest Heinrich Hertz, który w latach 1873-1888 potwierdził eksperymentalnie wszystkie przewidywania płynące z teorii Maxwella.

Wszelkie fale charakteryzują się długością, która określa odległość między ich grzbietami. Grzebienie morskich fal są zazwyczaj odległe od siebie o około 7-10 metrów. Fale dźwiękowe mają długość paru centymetrów. Elektromagnetyzm także występuje pod postacią fal. Światło widzialne - niebieskie, zielone, pomarańczowe, czerwone - znajduje się w środku widma elektromagnetycznego. Fale radiowe i mikrofały mają większą długość, a ultrafiolet, promienie rentgenowskie i gamma są krótsze.

Korzystając z detektora i cewki podłączonej do źródła wysokiego napięcia, Hertz znalazł sposób wytwarzania fal elektromagnetycznych i mierzenia ich prędkości. Wykazał, że fale te, podobnie jak fale świetlne, ulegają odbiciu, ugięciu i polaryzacji i że można je ogniskować. Pomimo niepocholebnych recenzji Maxwell miał rację. Hertz poddał teorię Maxwella eksperymentalnej weryfikacji, rozjaśnił ją i uprościł do „systemu czterech równań”, którym za chwilę się zajmiemy.

Dzięki Hertzowi idee Maxwella zostały powszechnie zaakceptowane i stary problem oddziaływania-na-odległość odszedł na zasłużony spoczynek. Siły przemieszczały się w przestrzeni ze skończoną prędkością - z prędkością światła - pod postacią pól. Maxwell sądził, że konieczny był jakiś ośrodek, by fale elektromagnetyczne mogły się rozchodzić, zaadaptował więc koncepcję przenikającego Wszechświat eteru Faradaya-Boškovića, w którym drgają pola elektryczne i magnetyczne. Podobnie jak odrzucony już wcześniej eter Newtona, tak i ten eter miał dziwaczne własności, które wkrótce miały odegrać ważną rolę w następnej rewolucji naukowej. Triumf koncepcji Faradaya-Maxwella-Hertza oznaczał kolejny sukces redukcjonizmu. Odtąd uniwersytety nie musia-

ły już zatrudniać osobno profesora elektryczności, profesora magnetyzmu i profesora optyki. Dziedziny te zostały zjednoczone i jeden profesor z powodzeniem wystarcza (zostanie więcej pieniędzy dla drużyny futbolowej). Szeroki wachlarz naturalnych zjawisk i wytworów myśli ludzkiej został ujęty w jednolity system: silniki i generatory, transformatory, cały przemysł elektroenergetyczny, światło słoneczne i światło gwiazd, fale radiowe i radar, i mikrofały, podczerwień i ultrafiolet, promienie Roentgena i gamma oraz lasery. Wszystko to można wyjaśnić za pomocą czterech równań Maxwella, które w nowoczesnej postaci, zastosowane do przepływu prądu w pustej przestrzeni, przybierają następującą postać:

$$c \nabla \times \mathbf{E} = -(\partial \mathbf{B} / \partial t)$$

$$c \nabla \times \mathbf{B} = (\partial \mathbf{E} / \partial t)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$

W równaniach tych E oznacza pole elektryczne, B to pole magnetyczne, a c , prędkość światła, odpowiada za związek wielkości elektrycznych i magnetycznych, które można zmierzyć doświadczalnie. Zwróć, drogi Czytelniku, uwagę na symetrię między E i B . Nie przejmuj się tymi niezrozumiałymi gryzmołami - nie musimy się wgłębiać w istotę znaczenia tych równań. Ważne jest to, że stanowią one naukowy ekwiwalent wezwania: „Niech się stanie światło!”

Na całym świecie studenci fizyki i inżynierii noszą koszulki ozdobione tymi czterema przaśnymi równaniami. Niczym nie przypominają równań sformułowanych przez Maxwella, gdyż ta uproszczona wersja to dzieło Hertza, będącego rzadkim przykładem kogoś więcej niż zwykłego eksperymentatora pobieżnie zaznajomionego z teorią. On był zupełnie wyjątkowy w obu dziedzinach. Podobnie jak Faraday, zdawał sobie sprawę z ogromnego znaczenia swoich prac, ale zupełnie się tym nie interesował. Zostawił to pomniejszonym umysłom naukowym, takim jak Marconi czy Larry King¹.

Teoretyczne prace Hertza polegały głównie na porządkowaniu spuścizny Maxwella i popularyzowaniu jego teorii. Gdyby nie wysiłki Hertza, studenci fizyki musieliby uprawiać kulturystykę, żeby nosić koszulki rozmiaru XXXL ozdobione nieporadnymi rachunkami Maxwella.

Wierni naszej tradycji i obietnicy danej Demokrytowi, który ostatnio przypomniał nam o niej przysyłając fax, musimy przebadać Maxwella (lub jego spuściznę) w sprawie atomów. Oczywiście, że w nie wierzył. Był też autorem bardzo popularnej teorii, traktującej gaz jako zbiorowisko atomów. Wierzył, i słusznie, że atomy chemiczne nie są tylko maleńkimi sztywnymi ciałami, lecz mają złożoną strukturę. Przekonanie to miało swe źródło w jego wiedzy na temat widm optycznych, które, jak się wkrótce przekonamy, stały się istotne dla rozwoju teorii kwantowej. Maxwell wierzył, niesłusznie, że te złożone atomy są niepodzielne. Wyraził to w piękny sposób w 1875 roku: „Choć na przestrzeni wieków w niebiosach wydarzały się i jeszcze mogą się wydarzyć katastrofy, choć dawne systemy mogą się rozpadać i nowe powstawać z ich ruin, atomy, z których te systemy [Ziemia, Układ Słoneczny itd.] są zbudowane - kamienie węgielne materialnego Wszechświata - pozostają niezniszczalne i nie zużyte”. Gdybyż tylko użył terminu „leptony i kwarki” zamiast „atomy”!

¹ Popularny w USA publicysta, gospodarz programu telewizyjnego komentującego bieżące wydarzenia społeczne i polityczne (przyp. tłum.).

Ostateczna ocena Maxwella znowu pochodzi od Einsteina, który stwierdził, że w XIX wieku Maxwell był autorem najważniejszego odkrycia, dokonanego przez jednego człowieka.

Magnes i kulka

Prześlizgnęliśmy się nad niektórymi ważnymi szczegółami naszej historii. Skąd wiemy, że pola rozprzestrzeniają się ze stałą prędkością? Skąd fizycy w XIX wieku w ogóle znali prędkość światła? I jaka jest różnica między natychmiastowym oddziaływaniem-na-odległość a reakcją spowolnioną?

Rozważmy bardzo silny magnes umieszczony w jednym końcu boiska piłkarskiego; w drugim znajduje się mała żelazna kulka zawieszona na bardzo długim, cienkim druciku. Kulka leciutecznie odchyła się od swego położenia w kierunku odległego magnesu. Przypuśćmy teraz, że potrafimy bardzo szybko wyłączyć prąd w elektromagnecie. Dokładna obserwacja kulki i drucika pozwala zarejestrować reakcję kulki powracającej do swego położenia równowagi. Ale czy ta reakcja jest natychmiastowa? „Tak” - mówią zwolennicy oddziaływania-na-odległość. Magnes i żelazna kulka są ze sobą ściśle związane i gdy zanika przyciąganie, kulka natychmiast zaczyna powracać do położenia o zerowym wychyleniu. „Nie” - mówią wyznawcy skończonej prędkości. Informacja „magnes jest wyłączony, można się wyprostować” wędruje wzdłuż boiska z pewną prędkością, zatem reakcja kulki następuje z pewnym opóźnieniem.

Dziś już znamy odpowiedź. Kulka musi poczekać, niedługo, bo informacja porusza się z prędkością światła, ale przez okres, który można zmierzyć. Jednak w czasach Maxwella problem ten znajdował się w samym centrum ożywionej dyskusji. Jej stawką było przyjęcie lub odrzucenie koncepcji pola. Dlaczego uczeni nie przeprowadzili po prostu eksperymentów, by rozstrzygnąć ów spór? Bo światło porusza się tak szybko, że potrzebuje tylko milionowej części sekundy na przebycie boiska piłkarskiego. W XIX wieku trudno było zmierzyć opóźnienia tej wielkości. Dziś bez kłopotu mierzymy odcinki czasu tysiąc razy krótsze od tamtego, więc bardzo łatwo przychodzi nam określić skończoną prędkość, z jaką zachodzą wydarzenia dotyczące elektromagnetyzmu. Odbijamy na przykład wiązkę światła laserowego od nowego zwierciadła umieszczonego na powierzchni Księżyca, by zmierzyć jego odległość od Ziemi. Podróż światła w obie strony trwa około sekundy.

Przykład na jeszcze większą skalę. Dnia 23 lutego 1987 roku, dokładnie o godzinie 7.36 czasu Greenwich, zaobserwowano eksplozję gwiazdy na południowej części sklepienia niebieskiego. Supernowa wybuchła w Wielkim Obłoku Magellana, galaktyce utworzonej z gwiazd i pyłu kosmicznego, znajdującej się w odległości 160 tysięcy lat świetlnych od Ziemi. Innymi słowy, informacja elektromagnetyczna o wybuchu podróżowała do nas przez 160 tysięcy lat. Supernowa 1987A jest naszym stosunkowo bliskim sąsiadem. Najodleglejszy obiekt dotąd zaobserwowany znajduje się w odległości około ośmiu miliardów lat świetlnych. Jego światło wyruszyło w kierunku naszego teleskopu całkiem niedługo po Początku.

Prędkość światła została zmierzona po raz pierwszy w ziemskim laboratorium przez Armand'a Hippolyte'a Louisa Fizeau w 1849 roku. Nie dysponując oscyloskopem i dokładnymi zegarami, Fizeau zastosował zmyślny układ lusterek (aby zwiększyć długość drogi przebywanej przez światło) i szybko wirującego koła zębatego. Jeśli znamy

prędkość, z jaką obraca się koło zębate, oraz jego promień, to potrafimy obliczyć czas, w jakim ząb następuje po szczelinie i na odwrót. Możemy tak dopasować prędkość kątową ruchu koła, aby ten czas był dokładnie równy czasowi, jaki promień świetlny zużywa na przejście od szczeliny do odległego lusterka i z powrotem do szczeliny, a dalej przez szczelinę do oka pana Fizeau. *Mon dieu!* Widzę! Teraz trzeba zwiększyć prędkość obrotów koła tak, aby zablokować światło. No właśnie, dzięki temu znamy odległość, jaką przebyło światło od źródła przez szczelinę do lusterka i z powrotem, oraz wiemy, ile zajęło mu to czasu. Manipulacje takim układem pozwoliły panu Fizeau otrzymać tę słynną wartość: 300 milionów metrów na sekundę (3×10^8 m/s).

Wciąż mnie zadziwia głębia filozoficzna wszystkich tych ludzi z okresu Renesansu Elektromagnetyzmu. Oersted wierzył (w odróżnieniu od Newtona), że wszystkie siły natury (wtedy były to grawitacja, elektryczność i magnetyzm) są różnymi przejawami jednej pierwotnej siły. To jest ta-a-a-kie nowoczesne! Wysiłki Faradaya zmierzające do wykazania symetrii łączącej elektryczność i magnetyzm przypominają greckie poszukiwania prostoty i unifikacji, dwóch ze stu trzydziestu siedmiu celów przyświecających Fermilabowi w latach dziewięćdziesiątych tego stulecia.

Pora do domu?

W dwóch ostatnich częściach (*Poszukiwanie atomu: mechanicy i Dalsze poszukiwania atomu*) *przedstawiłem ponad* trzysta lat rozwoju fizyki klasycznej, od Galileusza do Hertza. Opuściłem po drodze paru ważnych ludzi. Na przykład Holender Christiaan Huygens powiedział nam wiele na temat światła i fal. Francuz René Descartes (Kartezjusz), twórca geometrii analitycznej, występował jako czołowy adwokat atomizmu, a jego obszerne teorie dotyczące materii i kosmologii były bardzo twórcze, choć nie odniosły sukcesów.

Dokonaliśmy tego przeglądu fizyki klasycznej z nieortodoksyjnej perspektywy - z punktu widzenia poszukiwacza demokrytejskiego atomu. Zazwyczaj era klasyczna kojarzona jest z badaniami nad siłami - grawitacją i elektromagnetyzmem. Jak widzieliśmy, grawitacja przejawia się w przyciąganiu między dwiema masami. W elektryczności Faradaya rozpoznał inne zjawisko: materia jest tu bez znaczenia - mówił. Przyjrzyjmy się polom sił. Oczywiście, gdy już mamy siłę, musimy się odwołać do drugiego prawa Newtona ($F = ma$), by określić ruch przez nią wywoływany. Istotną rolę odgrywa tu masa bezwładna. Ujęcie Faradaya mówiące, że materia się nie liczy, wywodziło się z intuicji Boškovića, pioniera atomizmu. Natomiast Faraday dostarczył pierwszych wskazówek dotyczących „atomów elektryczności”. Być może nie należy patrzeć na historię nauki w ten sposób - jako na poszukiwanie pojęcia, ostatecznej cząstki. Ale i tak ona tam tkwi, pulsuje pod powierzchnią życia intelektualnego wielu herosów fizyki.

Pod koniec XIX wieku fizycy myśleli, że wszystko już zostało poznane. Cała elektryczność, cały magnetyzm, światło, mechanika, dynamika, a także kosmologia i grawitacja - wszystko zostało zbadane i opisane za pomocą paru prostych równań. Jeśli idzie o atomy, to większość chemików uważała, że temat w zasadzie jest zamknięty. Istniał układ okresowy. Wodór, hel, węgiel i inne pierwiastki były niepodzielne; każdy z nich składał się z osobnego rodzaju niewidocznych, niepodzielnych atomów.

Były wszakże pewne rysy na tym obrazie. Na przykład zagadka Słońca. Odwołując się do panujących wówczas poglądów z dziedziny chemii i teorii atomowej, brytyjski

uczony lord Rayleigh obliczył, że Słońce powinno wypalić całe swoje paliwo w ciągu 30 tysięcy lat. A przecież wiadomo było, że liczy znacznie więcej lat. Kłopot sprawiał też eter. Powinien mieć naprawdę dziwaczne własności mechaniczne. Musiałby być zupełnie przejrzysty, zdolny do prześlizgiwania się między atomami materii, nie oddziałując z nimi w żaden sposób, a z drugiej strony - sztywny jak stal, by pozwolić światłu rozwijać tak ogromną prędkość. Mimo to żywiono nadzieję, że z biegiem czasu te i inne zagadki zostaną rozwiązane. Gdybym uczył fizyki w 1890 roku, miałbym zapewne pokusę, by posłać studentów do domu, radząc im, aby poszukali sobie bardziej interesującej specjalności. Znalaziono odpowiedzi na wszystkie ważne pytania. Zdawało się, że zagadnienia, których nie rozumiano - źródła energii Słońca, radioaktywność i parę innych zagadek - prędzej czy później ulegną miażdżącej sile równań Newtona i Maxwella. Fizyka została elegancko zapakowana do pudełka i przewiązana kokardą.

Wtem nieoczekiwanie, u schyłku stulecia, cała paczka zaczęła się rozsypywać. Winowajcą były, jak zwykle, nauki eksperymentalne.

Pierwsza prawdziwa cząstka

W XIX wieku fizycy rozkochali się w wyładowaniach elektrycznych, które przeprowadzano w szklanych rurkach wypełnionych rozrzedzonymi gazami. Najpierw trzeba było sporządzić elegancką metrową rurkę ze szkła. W jej końce wtapiano metalowe elektrody. Następnie jak najstaranniej wypompowywano z niej powietrze, a na jego miejsce wpuszczano niewielką ilość jakiegoś innego gazu (wodór, powietrze, tlenek węgla). Przewody od elektrod podłączano do baterii i przykładano wysokie napięcie. Wtedy, w zaciemnionym pokoju, uczeni mogli podziwiać wspaniałe jarzącą się smugę, zmieniającą kształt i rozmiary w zależności od ciśnienia gazu w rurce. Każdy, kto widział świecąca się neon, zna ten rodzaj światła. Przy odpowiednio niskim ciśnieniu smuga zmieniała się w promień podróżujący od katody do anody, logicznie więc nazwano go promieniem katodowym. Zjawisko to, jak dziś już wiemy, dość złożone, fascynowało pokolenia fizyków i laików w całej Europie.

Naukowcy znali parę kontrowersyjnych, a nawet sprzecznych szczegółów dotyczących promieni katodowych. Niosły ze sobą ujemny ładunek elektryczny. Przemieszczały się po linii prostej. Mogły wprawić w ruch lekkie koło łopatkowe umieszczone na ich drodze. Pole elektryczne nie ugięło ich. Pole elektryczne ugięło je. Pole magnetyczne powodowało wygięcie w łuk cienkiej wiązki promieni katodowych. Zatrzymywała je gruba warstwa metalu, ale przedzierały się przez folię.

Fakty same w sobie interesujące, ale bez odpowiedzi pozostawało podstawowe pytanie: czym te promienie są? Pod koniec XIX wieku stawiano dwie hipotezy. Niektórzy sądzili, że były pozbawionymi masy drganiami elektromagnetycznymi w eterze. Nie najgorzej. W końcu jarzyły się jak wiązka światła, czyli inne drgania elektromagnetyczne. A ponadto elektryczność, jako forma elektromagnetyzmu, miała coś wspólnego z tymi promieniami.

Inny obóz uważał, że promienie te były rodzajem materii. Przypuszczano, że składały się z cząstek gazu, które przejęły ładunek od prądu elektrycznego. Dopuszczano też możliwość, że składały się z nowego rodzaju materii, małych cząstek nigdy jeszcze nie wyizolowanych. Z wielu powodów idea elementarnych nośników ładunku elektrycz-

nego wisiła już w powietrzu. Mogę od razu zdradzić tę tajemnicę: promienie katodowe nie były ani drganiami elektromagnetycznymi, ani cząstkami gazu.

Co by powiedział Faraday, gdyby żył pod koniec XIX wieku? Prawa Faradaya wyraźnie sugerowały istnienie „atomów elektryczności”. Jak pamiętamy, dokonywał on podobnych eksperymentów, z tą tylko różnicą, że przepuszczał prąd przez płyny, a nie przez gazy i w efekcie otrzymywał jony - naładowane atomy. Już w roku 1874 George Johnstone Stoney, irlandzki fizyk, wprowadził termin „elektron” na oznaczenie jednostki elektryczności traconej w procesie, w którym atom staje się jonem. Gdyby Faraday miał okazję zobaczyć promienie katodowe, zapewne wiedziałby w głębi ducha, że ogląda elektrony.

Możliwe, że niektórzy uczeni w tamtym okresie przypuszczali, iż promienie katodowe były cząstkami; może niektórzy myśleli, że w końcu znaleźli elektrony. Jak się o tym upewnić? Jak to udowodnić? W gorącym okresie przed rokiem 1895 wielu poważnych uczonych w Anglii, Szkocji, Niemczech i Stanach Zjednoczonych badało wyładowania w gazach. Tym, który trafił w dziesiątkę, okazał się Anglik J. J. Thomson. Byli też inni, którzy znaleźli się bardzo blisko. Przyjrzyjmy się dwóm z nich i temu, co zrobili, choćby tylko po to, by pokazać, jak gorzkie bywa życie naukowca.

Pruski fizyk Emil Wiechert miał największą szansę, by pobić Thomsona. Przedstawił swe doświadczenie słuchaczom zgromadzonym na wykładzie w styczniu 1887 roku. Użył szklanej rury o średnicy około 8 cm, która miała blisko 40 cm długości. Świejące promienie katodowe były wyraźnie widoczne w zaciemnionej sali.

Jeśli próbuje się osaczyć cząstkę, trzeba podać jej ładunek (e) i masę (m). W owym czasie nie potrafiono zważyć cząstki, o której mowa, bo była zbyt mała. By ominąć ten problem, wielu uczonych niezależnie od siebie wpadło na następujący sprytny pomysł: poddać promienie katodowe działaniu znanych sił elektrycznych i magnetycznych i badać ich reakcje. Pamiętamy, że $F = ma$. Jeśli promienie rzeczywiście składają się z cząstek obdarzonych ładunkiem elektrycznym, to siła, jakiej by doznawały, zależałaby od niesionego przez nie ładunku (e). Reakcja ta byłaby tłumiona przez masę bezwładną (m). Wobec tego efekt, który można zmierzyć, zależałby od ilorazu tych dwóch wielkości, od stosunku e/m . Innymi słowy, badacze nie mogli znaleźć indywidualnych wartości e czy m , tylko liczbę równą wartości jednej z nich podzielonej przez wartość drugiej. Przyjrzyjmy się prostemu przykładowi: mamy liczbę 21 i wiemy, że jest ona ilorazem dwóch liczb. 21 jest tylko wskazówką. Poszukiwanymi liczbami mogą być 21 i 1 albo 63 i 3, albo 7 i $1/3$, albo 210 i 10, *ad infinitum*. Ale jeśli można się domyślić, jaka jest wartość jednej z liczb, to już bardzo łatwo da się obliczyć drugą.

By znaleźć e/m , Wiechert umieścił rurkę między biegunami magnesu, co spowodowało wygięcie świetlistego promienia w łuk. Magnes popycha ładunek elektryczny cząstek. Im wolniej cząstki się poruszają, tym łatwiej magnes zakrzywia tor ich ruchu. Gdy już obliczył prędkość, z jaką się poruszają, na podstawie stopnia ugięcia otrzymał dość dobre przybliżenie wartości e/m .

Wiechert zdawał sobie sprawę, że gdyby odgadł wielkość ładunku elektrycznego, mógłby obliczyć masę cząstek. Wyciągnął następujący wniosek: „Nie mamy tu do czynienia z atomami znanymi chemii, ponieważ masa tych poruszających się cząstek [promieni katodowych] okazuje się 2-4 tysięcy razy mniejsza niż masa najlżejszego znanego nam atomu - wodoru”. Prawie trafił w dziesiątkę. Wiedział, że miał do czynienia z jakąś nową cząstką. Był piekielnie blisko, jeśli chodzi o masę (masa elektronu okazała się 1837 razy mniejsza od masy atomu wodoru). Dlaczego więc Thomson jest sławny, a

Wiechert nie? Bo Wiechert po prostu przyjął (odgadł) wartość ładunku elektrycznego; nie dysponował danymi pozwalającymi ten domysł uzasadnić. Poza tym rozpraszały go problemy związane ze zmianą pracy i zainteresowanie geofizyką. Był uczonym, który sformułował trafny wniosek, ale nie miał wszystkich potrzebnych danych. Nie będzie cygara, panie Emilu!

Drugim pretendentem był Walter Kaufmann z Berlina. Wpadł na metę w 1897 roku, a braki jego teorii stanowiły przeciwieństwo braków Wiecherta. Zebrał dobre dane, ale przeprowadził kiepskie rozumowanie. On także otrzymał wartość e/m , wykorzystując pola elektryczne i magnetyczne, ale wykonał w swym eksperymencie istotny krok dalej. Szczególnie interesowało go, jak e/m zmienia się ze zmianami ciśnienia i w zależności od rodzaju gazu wypełniającego rurę - powietrza, wodoru, dwutlenku węgla. W odróżnieniu od Wiecherta, Kaufmann sądził, że promienie katodowe były po prostu naładowanymi atomami gazu tkwiącego w rurce, więc spodziewał się, że stosując różne gazy, otrzyma różne wartości masy m . Niespodzianka! Odkrył, że e/m jest stałe, niezależnie od rodzaju i ciśnienia gazu wypełniającego rurkę. To mu zabiło ćwieka i wypadł z gry. A szkoda, bo jego eksperymenty były całkiem eleganckie i otrzymał dokładniejszą wartość e/m niż zwycięzca, J. J. Thomson. Nie usłyszał jednak tego, co dane krzyczały mu prosto w twarz: „Twoje cząstki są nową formą materii, głąbie! Te cząstki są istotnym składnikiem wszystkich atomów; dlatego właśnie e/m się nie zmienia”.

Joseph John Thomson (1856-1940) zaczynał swą działalność od fizyki matematycznej i był zaskoczony, gdy zatrudniono go jako profesora fizyki eksperymentalnej w słynnym Laboratorium im. Cavendisha na Uniwersytecie w Cambridge. Miło byłoby się dowiedzieć, czy w ogóle miał chęć zostać eksperymentatorem. Był znany z niezdarnego obchodzenia się ze sprzętem laboratoryjnym, ale miał szczęście do znakomitych asystentów, którzy wykonywali jego polecenia i trzymali go z dala od kruchego szkła.

W roku 1896 Thomson postawił sobie za cel zrozumienie natury promieni katodowych. Katoda wtopiona w jeden koniec szklanej rurki emituje swe tajemnicze promienie. Te zbiegają do anody, w której zrobiono otwór, aby przepuszczała część promieni (czytaj: elektronów). Utworzona w ten sposób wąska wiązka wędruje do końca rurki, gdzie pada na fluorescencyjny ekran i ukazuje się na nim w postaci małej zielonej plamki. W swym doświadczeniu Thomson wprowadził jeszcze jedną innowację: umieścił w rurce parę metalowych płytek o długości około 15 cm i podłączył je do baterii, otrzymując w ten sposób pole elektryczne zorientowane prostopadle do wiązki promieni katodowych, która przechodziła przez szczelinę dzielącą te płytki. Był to obszar ugięcia.

Jeśli wiązka zmienia kształt w obecności pola elektrycznego, to znaczy, że jest obdarzona ładunkiem elektrycznym. Jeśli zaś wiązka składa się na przykład z fotonów - cząstek światła - to zignoruje pole wytwarzane przez płytki i będzie kontynuować podróż po prostej. Thomson użył baterii dostarczających wysokiego napięcia i stwierdził, że plamka na ekranie przesuwa się w dół, gdy górna płytka jest podłączona do ujemnej elektrody, w górę zaś - gdy do dodatniej. Udowodnił w ten sposób, że promienie są obdarzone ładunkiem, a przy okazji odkrył, że jeśli płytki podłączone są do źródła prądu zmiennego (błyskawicznie następują po sobie zmiany plus-minus-plus-minus), zielona plamka szybko porusza się w górę i w dół, tworząc na ekranie zieloną kreskę. Był to pierwszy krok na drodze do wynalezienia telewizji i umożliwienia oglądania wieczornych wiadomości.

Ale jest rok 1896 i Thomson ma na głowie inne problemy. Ponieważ natężenie pola magnetycznego jest znane, proste obliczenia z zakresu mechaniki Newtona pozwalają

znaleźć odległość, o jaką powinna przesunąć się plamka, jeśli znana jest prędkość poruszania się promieni katodowych. Tu Thomson posłużył się pewną sztuczką. Otoczył rurkę polem magnetycznym tak dobranym, aby ugięcie wywoływane przez pole magnetyczne dokładnie niwelowało ugięcie wywoływane przez pole elektryczne. Ponieważ oddziaływanie magnetyczne zależne jest od nieznannej prędkości wiązki, można ją obliczyć, znając wielkość natężenia pola magnetycznego i elektrycznego. Mając już określoną prędkość ruchu promieni, powracamy do badania ugięcia wiązki promieni katodowych w polu elektrycznym. W efekcie tych badań otrzymuje się dokładną wartość ilorazu e/m , stosunek ładunku cząstki promieni katodowych do jej masy.

Z wielką wytrwałością Thomson przykłada pola, mierzy ugięcia, niweluje ugięcia, mierzy pola i zbiera dane, by otrzymać e/m . Tak jak Kaufmann, upewnia się co do poprawności wyników, stosując rozmaite rodzaje katod - glinową, platynową, miedzianą, cynową - i powtarzając cały eksperyment od nowa. Wszystkie próby dają w rezultacie tę samą liczbę. Thomson zmienia gaz wypełniający rurę: powietrze, wodór, dwutlenek węgla. Znow to samo. Thomson nie powtarza błędu Kaufmanna; wyciąga wniosek, że promienie katodowe nie są naładowanymi cząsteczkami gazu, lecz elementarnymi cząstkami, które muszą wchodzić w skład wszelkich form materii.

Jeszcze nie usatysfakcjonowany, w celu zdobycia dodatkowych dowodów postanawia wykorzystać zasadę zachowania energii. Chwyta promienie katodowe w metalowy blok. Ich energia jest znana; jest to po prostu energia elektryczna nadana cząstkom przez napięcie pochodzące z baterii. Mierzy wydzielone w bloku ciepło i zauważa, że można otrzymać wartość e/m także i w inny sposób - porównując energię hipotetycznych elektronów z tym ciepłem. W wyniku kolejnej długiej serii eksperymentów Thomson otrzymuje wartość e/m ($2,0 \times 10^{11}$ kulombów na kilogram) nie różniącą się zbytnio od pierwszego rezultatu. W roku 1897 ogłasza wyniki: „W promieniach katodowych mamy do czynienia z nowym stanem materii, ze stanem, w którym podział materii poprowadzony jest znacznie dalej niż w zwykłym stanie gazowym”. Ten „dalszy podział materii” doprowadził do tego, że otrzymaliśmy nowy składnik całej materii, będący częścią „substancji, z której zbudowane są pierwiastki chemiczne”.

Jak nazwać tę nową cząstkę? Termin Stoneya „elektron” był pod ręką i szybko się przyjął. Od kwietnia do sierpnia 1897 Thomson wykładał i pisał artykuły o cząsteczkowej naturze promieni katodowych. Działalność taką zwiemy marketingiem rezultatów.

Pozostawała do rozwiązania jeszcze jedna zagadka: konkretne wartości e i m . Thomson był w kropce, tak samo jak Wiechert parę lat wcześniej. Posłużył się więc podstępem. Wartość e/m tej nowej cząstki była około tysiąca razy mniejsza od e/m atomu wodoru, najlżejszego ze wszystkich znanych atomów. Thompson stwierdził więc, że albo e elektronu było znacznie większe niż e wodoru, albo że m znacznie mniejsze. Na co się zdecydować: na duże e czy małe m ? Intuicyjnie skłaniał się ku małemu m - odważny wybór, bo zakładał, że ta nowa cząstka ma maleńką masę, znacznie mniejszą niż masa wodoru. Pamiętajmy, że większość fizyków i chemików wciąż sądziła, że chemiczny atom jest niepodzielny. A Thomson twierdził, że blask dochodzący z jego rurki stanowił dowód świadczący o istnieniu powszechnego składnika, maleńkiej części składowej wszystkich atomów.

W 1898 roku Thomson zajął się mierzaniem ładunku elektrycznego swoich promieni katodowych, w ten sposób pośrednio mierzając także ich masę. Zrobił to, używając nowego urządzenia, zwanego komorą mgłową, wynalezionej przez szkockiego studenta C. T. R. Wilsona w celu badania deszczu, nie będącego wcale rzadkością w

Szkocji. Deszcz pada wtedy, gdy para kondensuje na pyłkach kurzu i zbiera się w krople. Gdy powietrze jest czyste, naładowane elektrycznie jony mogą spełniać rolę kurzu i na tym właśnie polega idea komory mgłowej. Thomson zmierzył całkowity ładunek zebrany w komorze za pomocą pewnej techniki elektrometrycznej, następnie określił indywidualny ładunek każdej kropelki, licząc ich ilość i dzieląc całkowity ładunek przez otrzymaną liczbę.

Kiedyś sam musiałem zbudować komorę Wilsona podczas studiów doktoranckich i od tego czasu nienawidzę tej techniki, nienawidzę Wilsona i wszystkich tych, którzy mają cokolwiek do czynienia z tym przekornym i woławatym urządzeniem. Z cudem graniczy to, że Thomson zdołał uzyskać poprawną wartość e , a co za tym idzie - masę elektronu. Ale to jeszcze nie wszystko. Przez cały okres poszukiwań elektronu musiał pracować z niezachwianą wytrwałością. Skąd znał natężenie pola elektrycznego - sprawdził na etykietce baterii? Nie było przecież żadnych etykiet. Skąd znał dokładną wartość natężenia pola magnetycznego, potrzebną do obliczenia prędkości? Jak mierzył prąd? Nawet samo odczytywanie wyników pomiarów nastroczało spore trudności. Wskazówka ma przecież jakąś grubość, może się trząść i drżeć. Jak jest wykalibrowana skala? Czy ma sens? W roku 1897 nie przestrzegano jeszcze bezwzględnych standardów przy produkcji rozmaitych urządzeń. Mierzenie napięcia, natężenia, temperatury, ciśnienia, odległości i czasu stanowiło nie lada problem. Każdy taki pomiar wymagał szczegółowej wiedzy o działaniu baterii, magnesu, mierników.

Był jeszcze problem, że tak powiem, polityczny - jak przekonać stosowne władze, by w ogóle dały środki na przeprowadzenie eksperymentów. Fakt, że Thomson sam był szefem, niewątpliwie okazał się pomocny. A na koniec zostawiłem najbardziej ważki problem: jak zdecydować, który eksperyment przeprowadzić? Thomson miał talent, polityczne obycie i wytrwałość. Dzięki temu doprowadził do końca przedsięwzięcie, które innym się nie powiodło. W roku 1898 oznajmił, że elektrony są składnikami atomu i że promienie katodowe są elektronami, które oddzieliły się od atomu. Naukowcy myśleli, że atom chemiczny jest pozbawiony struktury, niepodzielny. Thomson porwał go na strzępy.

Atom został rozplątany i znaleźliśmy pierwszą prawdziwą cząstkę elementarną, pierwszy a-tom. Słyszysz ten chichot?

7. Nagi atom

*Coś tu się dzieje.
Ale co, tego dokładnie nie wiadomo.*
BUFFALO SPRINGFIELD

W sylwestrowy wieczór 1999 roku, gdy cały świat będzie się przygotowywał do ostatniej wielkiej zabawy stulecia, wszyscy fizycy od Palo Alto po Nowosybirsk, od Kapsztadu po Reykiawik będą odpoczywali, wyczerpani świętowaniem przypadającej niemal dwa lata wcześniej setnej rocznicy odkrycia elektronu - pierwszej prawdziwej cząstki elementarnej. Fizycy uwielbiają świętowanie, chętnie urządzą wielkie przyjęcie urodzinowe każdej cząstce, choćby i najskromniejszej. Ale elektron to co innego! Będą tańczyć na ulicach.

Po odkryciu elektronu w miejscu jego narodzin - w Laboratorium im. Cavendisha na Uniwersytecie w Cambridge - często wznoszono toasty ku jego czci: „Za elektron, niech na zawsze pozostanie bezużyteczny!” Nic z tego. Dziś, niecałe sto lat później, cała nasza technologiczna superbudowla spoczywa na barkach tego maleństwa.

Prawie natychmiast po narodzinach elektron zaczął sprawiać kłopoty i do dziś nieustannie nas zdumiewa. Elektron jest opisywany „obrazowo” jako kula ładunku elektrycznego, która szybko wiruje wokół swej osi i wytwarza pole magnetyczne. J. J. Thomson strasznie się nabiedził, żeby wyznaczyć ładunek i masę elektronu, ale obecnie obie te wielkości znane są z dużą dokładnością.

A teraz kolej na kłopotliwe cechy. W dziwnym świecie atomu powszechnie przyjmuje się, że promień elektronu wynosi zero. Stąd wynikają pewne oczywiste pytania.

- Jeśli promień jest zerowy, to co wiruje?
- Jak to coś może mieć masę?
- Gdzie się znajduje ładunek?
- Skąd w ogóle wiadomo, że ten promień jest równy zero?
- Czy mogę dostać z powrotem moje pieniądze?

Stajemy tu oko w oko z problemem Boškovića. Rozwiązał on problem zderzeń „atomów”, przerabiając je na punkty - obiekty pozbawione wymiarów. Jego punkty były dosłownymi punktami matematycznymi, z tą tylko różnicą, że pozwolił punktowym cząstkom zachować zwyczajowo przypisywane im własności, takie jak masa i ładunek - źródło pola sił. Punkty Boškovića były tworam teoretycznymi, spekulatywnymi, ale elektron jest rzeczywisty. Możliwe, że jest punktową cząstką, ale ma wszystkie pozostałe własności. Masa, tak. Ładunek, tak. Wirowanie, tak. Promień - nie.

Przypomnij sobie, drogi Czytelniku, kota z Cheshire Lewisa Carrolla. Kot ten powoli znika, aż wreszcie pozostaje z niego tylko uśmiech. Nie kot, tylko uśmiech. Wyobraźmy sobie wirującą kulę ładunku elektrycznego o zmniejszającym się stopniowo promieniu, który wreszcie maleje do zera, pozostawiając nienaruszone: obrót, ładunek, masę i uśmiech.

Niniejsza część poświęcona jest narodzinom i rozwojowi teorii kwantowej. Jest to opowieść o tym, co dzieje się wewnątrz atomu. Zaczynam od elektronu, bo wirująca cząstka obdarzona masą, ale pozbawiona wymiarów jest czymś, przeciw czemu wzdra-

ga się nasza intuicja. Myślenie o czymś takim stanowi rodzaj umysłowych pompek. Na początku może to być nawet bolesne, bo trzeba będzie zaprząć do roboty rzadko używane mięśnie mózgowe.

Tak czy owak, pojęcie elektronu jako punktowej masy, punkowego ładunku i punkowego obrotu wywołuje pewne problemy pojęciowe. Boska Cząstka jest ściśle związana z tymi trudnościami strukturalnymi. Wciąż jeszcze nie do końca rozumiemy zjawisko istnienia masy, a elektron lat trzydziestych i czterdziestych był zwiastunem tych trudności. Niemal wszyscy zajęli się mierzaniem rozmiarów elektronu, z czego wynikło całe mnóstwo doktoratów. Z biegiem lat coraz dokładniejsza aparatura pozwalała osiągać coraz mniejsze i mniejsze wartości promienia elektronu - wszystkie niesprzeczne z koncepcją zerowego promienia. Jakby Bogini wzięła elektron w swe ręce i ścisnęła go najmocniej, jak tylko potrafiła. Przy użyciu wielkich akceleratorów zbudowanych w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych osiągnięto dalszy wzrost dokładności pomiarów. W roku 1990 stwierdzono, że promień elektronu jest mniejszy niż $0,000000000000000001$ cm, czyli 10^{-18} cm. To jest najlepsze zero, jakie fizycy mogą nam ofiarować... na razie. Gdybym miał dobry pomysł na przeprowadzenie eksperymentu, który pozwoliłby do tego wyniku dorzucić jeszcze jedno zero, rzuciłbym wszystko i postarałbym się, by pozwolono mi go zrealizować.

Inną ciekawą cechą elektronu jest jego własność, zwana momentem magnetycznym albo czynnikiem g . Jego wartość obliczono wykorzystując teorię kwantową; ma on wynosić:

$$2 \times (1,001159652190).$$

A były to nie lada obliczenia! Wprawni teoretycy, wspomagani przez superkomputery, potrzebowali wielu lat pracy, by dojść do tej liczby. Ale przecież to tylko teoria. Chcąc ją sprawdzić, eksperymentatorzy zaplanowali pomysłowe doświadczenia i otrzymali wartość o podobnym poziomie dokładności. Wynik uzyskany przez Hansa Dehmelta z Uniwersytetu Stanu Waszyngton wynosił:

$$2 \times (1,001159652193).$$

Jak widać, te dwie wartości są identyczne aż do jedenastego miejsca po przecinku. Oto spektakularny przykład zgodności teorii z eksperymentem. Chcę zwrócić uwagę na to, że obliczenie wielkości momentu magnetycznego było możliwe dzięki teorii kwantowej, w której sercu leży heisenbergowska zasada nieoznaczoności. W 1927 roku w Niemczech sformułowano zaskakującą tezę, że niemożliwe jest jednoczesne zmierzenie prędkości i położenia cząstki z dowolną dokładnością. Ta niemożność jest zupełnie niezależna od zdolności eksperymentatora i budżetu, jakim dysponuje. Jest fundamentalnym prawem przyrody.

A jednak, mimo że teoria kwantowa utkana jest na osnowie nieoznaczoności, pozwala ona na formułowanie przewidywań - takich jak wartość czynnika g - które są aż do jedenastego miejsca po przecinku zgodne z doświadczeniem. Teoria kwantowa jest bez wątpienia teorią rewolucyjną, tworzącą fundament, na którym wznosi się gmach dwudziestowiecznej nauki... a zaczyna się od przyznania się do niepewności.

Skąd się wzięła ta teoria? To niezła opowieść detektywistyczna. I jak każda zagadka, zawiera różne tropy - niektóre prawdziwe, inne fałszywe. Wszędzie kręcą się kamerdynerzy, by zbijać detektywów z tropu. Policja miejska, stanowa, agenci FBI wchodzą sobie nawzajem w drogę, kłócą się, współpracują i rozmijają. Jest wielu bohaterów. Są zamachy, śmiałe posunięcia i kontrposunięcia. Moja relacja będzie bardzo nieobiektywna, ale mam nadzieję, że uda mi się ukazać proces kształtowania się i ewolucji poglą-

dów od roku 1900 aż po 1930, kiedy to dojrzała już rewolucyjna teoria nadali ostateczny kształt. Z góry jednak ostrzegam, że mikroświat jest sprzeczny z intuicją. Eksperymentalnie potwierdzono spójność teorii, według której w atomowym mikroświecie istnieją punktowe masy, punktowe ładunki i punktowe obroty, ale nie są to rzeczy, jakie widzimy wokół siebie na co dzień, w namacalnym makroskopowym świecie. Jeśli przebrnąwszy przez ten rozdział mamy pozostać przyjaciółmi, musimy nauczyć się rozpoznawać myślowe nawyki, wynikające z naszego ograniczonego doświadczenia makroświata. Zapomnijmy więc o tym, co normalne, spodziewajmy się szoku, zaskoczenia, niedowierzania. Niels Bohr, jeden z twórców teorii kwantowej, powiedział, że jeśli ona kogoś nie szokuje, to znaczy, że jej nie rozumiał. Richard Feynman twierdził, że nikt nie rozumie teorii kwantowej. („To czego chce pan od nas?” - pytają moi studenci). Einstein, Schrödinger i inni wielcy uczeni nigdy nie zaakceptowali implikacji płynących z tej teorii, a mimo to uważa się obecnie, że nie możemy się obejść bez elementów kwantowej dziwaczności, jeśli mamy zrozumieć powstanie Wszechświata.

W arsenale intelektualnego oręża, które zdobywcy nieśli z sobą na podbój nowego świata, znalazły się mechanika Newtona i równania Maxwella. Zdawało się, że wszystkie makroskopowe zjawiska uległy tym potężnym syntezom, ale eksperymenty z ostatniej dekady XIX wieku zaczęły niepokoić teoretyków. Omówiliśmy już te, które doprowadziły do odkrycia elektronu. W roku 1895 Wilhelm Roentgen odkrył promieniowanie rentgenowskie. W roku 1896 Henri Becquerel przypadkowo odkrył radioaktywność, ponieważ w jednej szufladzie przechowywał płyty fotograficzne i grudkę uranu. Radioaktywność wkrótce doprowadziła do powstania pojęcia średniego czasu życia. Różne substancje radioaktywne rozpadały się w charakterystycznym tempie, które można było zmierzyć, ale nie dało się przewidzieć, kiedy ulegnie rozpadowi poszczególny atom. Co to miało znaczyć? Nikt nie wiedział. Żadnego z tych zjawisk nie można było wyjaśnić za pomocą klasycznych środków.

Gdy tęcza już nie wystarcza

Fizycy zaczęli także zwracać uwagę na światło i jego własności. Za pomocą szklanego pryzmatu Newton wykazał, że rozszczepiając białe światło słoneczne na składniki jego widma, można odtworzyć tęczę. W otrzymanej tęczy każdy kolor począwszy od czerwonego płynnie przechodzi w następny, aż po intensywny fiolet. W roku 1815 Joseph von Fraunhofer znacznie udoskonalił układ optyczny stosowany do obserwacji kolorów wyłaniających się z pryzmatu. Teraz, kiedy się popatrzyło przez mały teleskop, rozdzielone kolory było widać niezwykle ostro. Za pomocą tego przyrządu - no proszę! - Fraunhofer dokonał odkrycia: na wspaniałe kolory słonecznego widma nakładała się seria cienkich, nieregularnie, jak się zdawało, rozmieszczonych ciemnych linii. Ostatecznie Fraunhofer zarejestrował 576 takich linii. Co to oznaczało? Za jego czasów uważano, że światło jest zjawiskiem falowym. Później James Clerk Maxwell miał wykazać, że fale światła są polami elektrycznymi i magnetycznymi i że kluczowym parametrem umożliwiającym opis światła jest odległość między kolejnymi grzbietami fali, czyli długość, która determinuje jej barwę.

Znając długości fal, można gamie kolorów przypisać skalę liczbową. Światło widzialne należy do przedziału od 8000 angstromów (0,00008 cm), co odpowiada głębokiej czerwieni, do 4000 angstromów (0,00004 cm) - ciemny fiolet. Dysponując taką ska-

lą, Fraunhofer mógł dokładnie określić położenie każdej z dostrzeżonych ciemnych kreszek. Na przykład jedna taka słynna linia, znana jako $H\alpha$, czy też „ha-alfa” (jeśli nie podoba ci się, drogi Czytelniku, „ha-alfa”, to możesz ją nazwać „Zenio”), odpowiada długości 6562,8 angstroma, a zatem leży sobie wśród zieleni, mniej więcej w środku widma.

Co nas obchodzą te linie? Otóż obchodzą, bo w roku 1859 niemiecki fizyk Gustav Robert Kirchhoff odkrył istotny związek łączący te linie z pierwiastkami chemicznymi. Podgrzewał rozmaite pierwiastki - miedź, węgiel, sód itd. - umieszczając je w płomieniu palnika, aż zaczynały się żarzyć. Podgrzewał też rozmaite gazy uwięzione w rurkach i używał jeszcze dokładniejszej aparatury optycznej do obserwacji widm emitowanych przez rozżarzone gazy. Odkrył, że każdy pierwiastek emituje typową dla siebie serię bardzo ostrych, jaskrawo zabarwionych linii nałożonych na ciemniejsze tło barw płynnie przechodzących jedna w drugą. Wewnątrz teleskopu Kirchhoff miał wygrawerowaną skalę z zaznaczonymi jednostkami długości fali, dzięki czemu mógł dokładnie określić położenie każdej jasnej linii. Ponieważ z każdym pierwiastkiem związany jest inny układ linii, Kirchhoff i jego współpracownik Robert Bunsen uzyskali „odciski palców” pierwiastków w postaci linii widmowych. (Kirchhoff potrzebował pomocy przy podgrzewaniu próbek; kóż lepiej mógłby się do tego nadawać od człowieka, który wynalazł palnik Bunsena?) Dość szybko uczeni ci nauczyli się identyfikować niewielkie domieszki jednej substancji ukryte w drugiej - wykrywać zanieczyszczenia.

Nauka zyskała teraz narzędzie pozwalające badać skład chemiczny dowolnej substancji, która wysyła światło - na przykład Słońca, a potem, z biegiem czasu, także i odległych gwiazd. Uczeni odkryli mnóstwo nowych pierwiastków w ten sposób, że znajdowali nie zarejestrowane wcześniej linie widmowe. Pierwiastek zwany helem znaleziono najpierw na Słońcu w 1878 roku. Dopiero siedemnaście lat później odkryto go na Ziemi.

Pomyśl tylko, drogi Czytelniku, o tej wzruszającej chwili, gdy przeanalizowano po raz pierwszy światło odległej gwiazdy... i okazało się, że składa się z tego samego tworzywa, jakie mamy tu, na Ziemi! Ponieważ docierające do nas światło gwiazd jest bardzo słabe, trzeba było wielkich umiejętności i wysoko rozwiniętej techniki, aby zbadać układy kolorów i linii. Wniosek narzucał się jednak nieodparcie: Ziemia zbudowana jest z tego samego tworzywa co Słońce i gwiazdy. I nie znaleźliśmy jeszcze w przestrzeni takiego pierwiastka, którego nie mielibyśmy tu, u siebie. Wszyscy jesteśmy zbudowani z gwiazdowego pyłu. Odkrycie to ma niesłychane znaczenie dla wszelkich prób formowania ogólnych teorii na temat świata, w którym żyjemy. Wspiera ono poglądy Kopernika: nie jesteśmy wyjątkowi.

No tak, ale dlaczego Fraunhofer, który to wszystko zapoczątkował, znajdował ciemne linie w widmie Słońca? Wkrótce i to wyjaśniono. Gorące jądro Słońca (bardzo gorące, rozgrzane do białości) emituje światło o wszystkich długościach fal, ale przechodząc przez stosunkowo chłodne gazy na powierzchni Słońca, ulega ono przefiltrowaniu. Gazy absorbują światło o tej właśnie długości, które same „lubią” wysyłać. Dlatego też ciemne linie Fraunhofera reprezentują absorpcję. Jasne linie Kirchhoffa pochodzą z emisji.

Oto znajdujemy się u schyłku XIX wieku. Co sądzić o tym wszystkim? Atomy chemiczne miały być twardymi, masywnymi, pozbawionymi struktury, niepodzielnymi atomami, a jednak każdy z nich potrafi emitować i absorbować energię elektromagnetyczną w postaci wyraźnych i charakterystycznych linii. Niektórzy uczeni rozpoznali w tym głośnie wołanie: struktura! Wiedzano, że obiekty mechaniczne o pewnej strukturze

wpadają w rezonans w odpowiedzi na regularne impulsy: struny w fortepianie czy skrzypcach drgają, aby wydawać dźwięki, kieliszki pękają, gdy zwalisty tenor zaśpiewa doskonałą nutę. Żołnierze maszerujący rytmicznie nogą w nogę mogą wprawić most w drgania o wielkiej amplitudzie. I tym też właśnie jest światło - rytmicznymi impulsami, których częstość równa się prędkości podzielonej przez długość fali. Podobne mechaniczne przykłady doprowadziły do postawienia pytania: jeśli atomy nie mają żadnej struktury wewnętrznej, to jak mogą wykazywać własności rezonansowe, których przykładem są linie widmowe?

A jeśli atomy mają wewnętrzną strukturę, to co w tej sprawie mówią teorie Newtona i Maxwella? Promieniowanie rentgenowskie, radioaktywność, elektron i linie widmowe miały jedną cechę wspólną. Zjawisk tych nie można było wytłumaczyć na gruncie klasycznych teorii (choć wielu próbowało). Z drugiej jednak strony, żadne z tych zjawisk nie pozostawało w wyraźnej sprzeczności z klasyczną teorią Newtona/Maxwella. Po prostu nie można ich było wyjaśnić, ale dopóki brakowało dowodów rzeczowych, zawsze istniała nadzieja, że jakiś młody mądrala w końcu znajdzie sposób, by uratować fizykę klasyczną. Nigdy do tego nie doszło, pojawił się natomiast dowód rzeczowy, a właściwie co najmniej trzy takie dowody.

Dowód rzeczowy nr 1: katastrofa w ultrafiolecie

Pierwszym obserwowanym zjawiskiem, które bez ogródek zadawało kłam teorii klasycznej było „promieniowanie ciała doskonale czarnego”. Wszystkie ciała wypromieniowują energię; tym więcej, im są gorętsze. Żywy, oddychający człowiek emituje około 200 watów promieniowania należącego do niewidzialnego, podczerwonego przedziału widma elektromagnetycznego. (Teoretycy emitują 210 watów, a politycy dochodzą do 250).

Wszystkie ciała również absorbują energię ze swego otoczenia. Jeśli ich temperatura jest wyższa niż temperatura otoczenia, stygną, gdyż emitują więcej energii, niż jej pochłaniają. „Ciało doskonale czarne” to termin określający ciało idealnie pochłaniające, czyli takie, które absorbuje 100 procent docierającego do niego promieniowania. Kiedy takie ciało jest zimne, wydaje się czarne, bo nie odbija żadnego światła. Eksperymentatorzy lubią używać ciała doskonale czarnego jako wzorca przy pomiarach emitowanego promieniowania. W promieniowaniu ciała doskonale czarnego - takiego jak kawałek węgla, żelazna podkowa czy spirala grzejna w prodiżu - ciekawa jest barwa widma: ile światła emituje ono na poszczególnych długościach fal. W miarę podgrzewania tych ciał, oczom naszym ukazuje się najpierw czerwona poświata, potem światło jasnoczerwone, żółte, białoniebieskie i wreszcie (bardzo, bardzo gorąco!) białe. Dlaczego na końcu jest białe?

Zmiany zabarwienia promieniowania mówią nam o tym, że podczas podgrzewania maksimum intensywności emitowanego światła przesuwają się od podczerwieni przez czerwień, żółć do błękitu. Jednocześnie z przesuwaniem się szczytu intensywności rozszerza się zakres emitowanych długości fal. Zanim maksimum dobiegnie do błękitu, tyle innych kolorów jest wypromieniowywanych, że gorące ciało wydaje się białe. Mówimy: rozgrzane do białości. Dziś astrofizycy badają promieniowanie ciała doskonale czarnego, które pozostało po najbardziej gorącym etapie w historii Wszechświata - po Wielkim Wybuchu.

Ale wróćmy do tematu. W ostatniej dekadzie XIX wieku otrzymywano coraz lepsze dane dotyczące promieniowania ciała doskonale czarnego. Co teoria Maxwella miała do powiedzenia w sprawie tych danych? Katastrofa! Zupełnie się myliła. Przewidywała niewłaściwy kształt krzywej rozkładu natężenia światła dla różnych kolorów, czyli zależności natężenia od długości fali. W szczególności przewidywała, że w największych ilościach jest emitowane światło o najmniejszej długości fali - należące do fioletowego końca widma, aż po niewidzialny ultrafiolet. A tak wcale nie jest i stąd właśnie „katastrofa w ultrafiolecie” - nasz dowód rzeczowy numer jeden.

Na początku sądzono, że to niepowodzenie równań Maxwella zostanie naprawione, kiedy zdobędzie się dokładniejszą wiedzę o tym, jak promieniująca materia wytwarza energię elektromagnetyczną. Pierwszym fizykiem, który w 1905 roku rozpoznał znaczenie tej porażki, był Albert Einstein, ale pole dla mistrza przygotował inny teoretyk.

Na scenę wkracza Max Planck, teoretyk z Berlina, po czterdziestce, mający już za sobą długą karierę w fizyce, ekspert od teorii ciepła. Był bardzo zdolny i bardzo... „profesorski”. Pewnego razu, gdy zapomniał, gdzie miał wygłosić wykład, wstąpił do sekretariatu i zapytał: „Proszę mi powiedzieć, w której sali wykłada dziś profesor Planck?” Usłyszał surową odpowiedź: „Niech pan tam nie idzie, młody człowieku. Jest pan o wiele za młody na to, by zrozumieć wykład naszego uczonego profesora Plancka”.

W każdym razie, Planck miał bezpośredni dostęp do najświeższych danych eksperymentalnych, z których większość otrzymywali jego koledzy z berlińskiego laboratorium. Postawił sobie za cel zrozumienie tych danych. Intuicyjnie odgadł równanie matematyczne, które dobrze do nich pasowało. Równanie to nie tylko poprawnie określało kształt krzywej rozkładu intensywności światła dla ustalonej temperatury, ale także dobrze opisywało zmiany krzywej (rozkładu natężenia w funkcji długości fal) w zależności od temperatury. Ze względu na dalszy rozwój wypadków pragnę już teraz podkreślić, że kształt takiej krzywej pozwala określić temperaturę ciała wysyłającego promieniowanie. Planck miał powody, by być z siebie dumny. „Dziś dokonałem odkrycia równie ważnego, jak odkrycie Newtona” - chwalił się swemu synowi.

Następnym problemem, który Planck musiał rozwiązać, było podczepienie swego domysłu do jakiegoś prawa przyrody. Dane uporczywie wskazywały na to, że ciała doskonale czarne emitują bardzo mało promieniowania o małej długości fali. Z jakiego prawa przyrody mógł wynikać zakaz emisji fal krótkich, tak ukochanych przez klasyczną teorię Maxwella? Parę miesięcy po opublikowaniu swego szczęśliwego równania Planck wpadł na pomysł. Ciepło jest formą energii i dlatego temperatura ciała ogranicza ilość energii, jaką dane ciało może wypromieniować. Im gorętsze, tym więcej jest dostępnej energii. W klasycznej teorii energia rozkłada się równomiernie między różne długości fal. ALE (dostań gęsiej skórki, do diabła, za moment odkryjemy teorię kwantową) przypuścimy, że krótsze fale „kosztują” więcej energii. W takim wypadku, gdy próbujemy wysłać krótkie fale, zaczyna nam brakować energii.

Planck stwierdził, że aby uzasadnić swoje równanie (zwane teraz prawem promieniowania Plancka), musi przyjąć dwa założenia. Po pierwsze, ilość wypromieniowanej energii zależy od długości fali światła. Po drugie, ze zjawiskiem tym nieodłącznie związana jest dyskretność. Planck mógł uzasadnić swoje równanie i zachować zgodność z prawami rządzącymi wymianą ciepła dzięki założeniu, że energia emitowana jest w postaci dyskretnych wiązek albo porcji energii, czy też - uwaga, oto i one! - w postaci kwantów. Energia każdej takiej porcji związana jest z częstotliwością za pośrednictwem prostego równania $E = h\nu$. Kwant energii E równa się częstotliwości fali światła ν pomnożonej

przez stałą h . Ponieważ częstość jest odwrotnie proporcjonalna do długości fali, krótkie fale (czyli fale o wysokich częstościach) wymagają większej energii. W określonej temperaturze dostępna jest tylko określona ilość energii, a zatem fale o wysokiej częstości muszą być tłumione. Ta dyskretność była nieodzowna dla uzyskania poprawnej odpowiedzi. Częstość równa jest prędkości światła podzielonej przez długość fali.

Wartość stałej wprowadzonej przez Plancka, h , wynikała z danych doświadczalnych. Ale czym jest ta stała h ? Planck nazwał ją „kwantem działania”, ale historia ochrzciła ją „stałą Plancka” i już na zawsze będzie ona symbolem rewolucyjnej, nowej fizyki. Jeśli chcesz wiedzieć, drogi Czytelniku, stała Plancka ma wartość $4,11 \times 10^{-15}$ elektronowoltów razy sekunda (eV·s), ale nie musisz jej zapamiętywać. Zauważ tylko, że ze względu na czynnik 10^{-15} (15 miejsc po przecinku) jest to bardzo mała liczba.

Wprowadzenie pojęcia kwantu czy porcji energii świetlnej stanowiło punkt zwrotny, choć ani Planck, ani jego koledzy nie od razu docenili głębi tego odkrycia. Wyjątek stanowił Einstein, który rozpoznał prawdziwe znaczenie kwantów Plancka. Jednak reszta społeczności naukowej potrzebowała 25 lat, by w pełni zaakceptować tę nową ideę. Stworzone przez Plancka równanie niepokoiło go; nie chciał przecież doprowadzić do obalenia fizyki klasycznej. W końcu przyznał: „Musimy się pogodzić z teorią kwantową i, wierzcie mi, ona się rozrośnie, nie będzie dotyczyła tylko optyki. Obejmie także inne dziedziny”. I miał rację!

Chciałbym jeszcze wspomnieć o satelicie *Cosmic Background Explorer* (badającym promieniowanie tła kosmicznego), w skrócie zwanym *COBE*. W latach dziewięćdziesiątych *COBE* przekazał swym zachwyconym twórcom - astrofizykom - dane dotyczące rozkładu widmowego promieniowania tła kosmicznego, przenikającego całą przestrzeń. Dane te, o niespotykanej dotąd precyzji, dokładnie pasują do równania Plancka opisującego promieniowanie ciała doskonale czarnego. Pamiętajmy, że kształt krzywej rozkładu intensywności światła w zależności od jego długości pozwala na określenie temperatury ciała wysyłającego to promieniowanie. Wykorzystując dane dostarczone przez *COBE* i równanie Plancka, badacze mogli obliczyć przeciętną temperaturę Wszechświata. Zimno tu: 2,73 stopnia powyżej zera absolutnego.

Dowód rzeczowy nr 2: zjawisko fotoelektryczne

Przenieśmy się teraz do Alberta Einsteina pracującego jako urzędnik w szwajcarskim urzędzie patentowym w Bernie. Jest rok 1905. Einstein uzyskał doktorat w roku 1903 i spędził następne dwanaście miesięcy, dumając nad porządkiem świata i sensem życia. Ale rok 1905 był dla niego dobrym rokiem. Zdołał rozwiązać trzy ważne problemy gnębiące fizyków: efekt fotoelektryczny (nasz temat), ruchy Browna (sprawdź sobie gdzieś, drogi Czytelniku, co to takiego) i, no tak, sformułował szczególną teorię względności. Einstein zrozumiał, że z hipotezy Plancka wynika, iż światło, energia elektromagnetyczna, jest wysyłane w postaci dyskretnych porcji energii $h\nu$, a nie - jak chciała fizyka klasyczna - w sposób ciągły, kiedy jedna długość fali gładko i bez zakłóceń przechodzi w drugą.

To musiało poddać Einsteinowi pomysł wyjaśnienia obserwacji Heinricha Hertza, który wytwarzał fale radiowe, by wypróbować teorię Maxwella. Hertz robił to w ten sposób, że wywoływał przeskoki iskry między dwiema metalowymi kulkami. Zauważył, że iskry pojawiają się częściej wtedy, gdy kulki są świeżo wypolerowane. Przypuszczał, że

polerowanie w jakiś sposób ułatwiało ładunkom opuszczenie powierzchni kulek. Będąc człowiekiem z natury dociekliwym, spędził trochę czasu, badając wpływ, jaki światło wywiera na metalowe powierzchnie. Zauważył, że aby odciągnąć ładunki z metalowej powierzchni, potrzebował iskry niebiesko-fioletowego światła. Te ładunki z kolei wzmacniały proces, pomagając w formowaniu isker. Hertz sądził, że polerowanie pozwala usunąć tlenki, które utrudniają oddziaływanie światła z powierzchnią metalu.

Niebiesko-fioletowe światło stymulowało elektrony, by wypływały z metalu, co w owym czasie wydawało się dziwnym zjawiskiem. Eksperymentatorzy zajęli się systematycznymi badaniami tego zjawiska i zauważyli następujące interesujące fakty:

1. Czerwone światło nie uwalnia elektronów, nawet jeśli jest nadzwyczaj intensywne.
2. Fioletowe światło, nawet stosunkowo słabe, bardzo łatwo wyzwala elektrony.
3. Im mniejsza długość fali padającego światła (im bardziej jest ono fioletowe), tym wyższa jest energia uwolnionych elektronów.

Einstein zdał sobie sprawę, że pomysł Plancka, według którego światło występuje w porcjach, mógł stanowić klucz do zrozumienia tajemnicy zjawiska fotoelektrycznego. Wyobraźmy sobie elektron, który zajmuje się własnymi sprawami w wypolerowanej przez Herta metalowej kulce. Jaki rodzaj światła może użyć temu elektronowi dość energii, by mógł oderwać się od powierzchni kulki? Posługując się równaniem Plancka, Einstein stwierdził, że jeśli długość fali światła jest odpowiednio mała, to elektron otrzymuje dość energii, by oderwać się od powierzchni i umknąć. Elektron albo połyka od razu całą potrzebną porcję energii, albo nie - rozumował Einstein. Jeśli długość fali połączonej porcji jest zbyt duża, nie dostarcza ona wystarczającej ilości energii i elektron nie może uciec. Zalewanie metalu potokami nieudolnych (długofalowych) porcji energii świetlnej na nic się nie zda. Einstein stwierdził, że liczy się energia porcji, a nie to, ile tych porcji mamy do dyspozycji.

Pomysł Einsteina działał znakomicie. W zjawisku fotoelektrycznym kwanty światła, czyli fotony, są absorbowane, a nie - jak w teorii Plancka - emitowane. Oba te procesy wymagają kwantów o energii $E = h\nu$. Koncepcja kwantów zaczynała nabierać znaczenia. Istnienie fotonu nie zostało przekonująco udowodnione aż do roku 1923, kiedy to Amerykanin Arthur Compton zdołał wykazać, że foton może się zderzyć z elektronem, tak jak zderzają się dwie kule bilardowe. Wynikiem zderzenia jest zmiana kierunku ruchu, energii i pędu. Foton pod każdym względem zachowywał się jak cząstka - szczególnego rodzaju cząstka - w pewien sposób związana z częstością drgań, czy też długością fali.

W ten sposób wskrzeszono stary spór. Od dawna dyskutowano nad naturą światła. Przypomnijmy, że Newton i Galileusz utrzymywali, że światło składało się z cząstek. Duński astronom Christiaan Huygens bronił teorii falowej. Ta historyczna debata newtonowskich cząstek przeciw huygensowskim falom została rozstrzygnięta na początku XIX wieku na korzyść fal przez doświadczenie Thomasa Younga z podwójną szczeliną (omówimy je wkrótce). Teoria kwantowa wskrzesiła cząstkę - w postaci fotonu - i stary dylemat „fala-czy-cząstka” ożył na nowo, by doczekać się niespodziewanego rozstrzygnięcia.

Ale fizykę klasyczną czekały jeszcze większe trudności: dzięki Ernestowi Rutherfordowi i dokonaniem przez niego odkryciu jądra atomowego.

Dowód rzeczowy nr 3: kto lubi ciasto z rodzynkami?

Ernest Rutherford jest jedną z tych osobowości, które wydają się zbyt barwne, by mogły być prawdziwe. Zupełnie jak gdyby trafił do społeczności naukowej prosto z agencji artystycznych w Hollywood. Zwalisty, gburowaty Nowozelandczyk, z wąsami przypominającymi morsa, był pierwszym cudzoziemcem przyjętym na studia doktoranckie do słynnego Laboratorium im. Cavendisha, którym kierował wówczas J. J. Thomson. Rutherford przybył w samą porę, by być świadkiem odkrycia elektronu. Uzdolniony manualnie (w przeciwieństwie do Thomsona), był znakomitym eksperymentatorem. Faraday miałby w nim godnego rywala do tytułu najlepszego eksperymentatora wszech czasów. Rutherford znany był z głęboko zakorzonego przekonania, że obrzucanie eksperymentów wiązkami przekleństw bardzo dobrze na nie wpływa. Koncepcja ta znalazła silne poparcie w wynikach doświadczalnych, nawet jeśli teoretycznie nie była dostatecznie uzasadniona. Mówiąc o Rutherfordzie, trzeba koniecznie zwrócić uwagę na uczniów i studentów, którzy pod jego czujnym okiem przeprowadzili wspaniałe eksperymenty. Było ich wielu; między innymi Charles D. Ellis (odkrywca rozpadu β)¹, James Chadwick (odkrywca neutronu), Hans Geiger (o liczącej się sławie). Proszę sobie nie myśleć, że łatwo jest nadzorować grupę pięćdziesięciu studentów. Choćby dlatego, że trzeba czytać ich prace. Oto jak jeden z moich najlepszych studentów zaczął swoją pracę magisterską: „Fizyka jest dziedziną tak dziewiczą, że ludzkie oko nie postawiło na nim jeszcze stopy”. Ale wracajmy do Ernesta.

Rutherford żywił wobec teoretyków źle skrywaną pogardę, chociaż, jak się zaraz przekonamy, sam był całkiem niezłym teoretykiem. Na jego szczęście na początku XX wieku nie pisywano w prasie o pracach naukowych tyle, co teraz, bo miał tak niewyparzoną gębę, że z pewnością zniechęciłby do siebie całe tłumy fundatorów. Oto garstka wypowiedzi Rutherforda, które przetrwały wiele dziesięcioleci i dotarły do nas:

- „Żebym na moim wydziale nie przyłapał nikogo na rozmowach o Wszechświecie!”
- „Och, te rzeczy [teoria względności]. Nigdy nie zawracamy sobie tym głowy przy pracy”.
- „Cała nauka dzieli się na fizykę i zbieranie znaczków”.
- „Właśnie czytałem niektóre z moich pierwszych publikacji i, wiesz, kiedy skończyłem, powiedziałem sobie: »Rutherford, mój chłopie, byłeś piekielnie bystrym gościem«”.

Ten piekielnie bystry gość spędził trochę czasu u Thomsona, przeskoczył przez Atlantyk, by pracować na Uniwersytecie McGilla w Montrealu, potem powędrował z powrotem do Anglii i zatrudnił się na Uniwersytecie w Manchesterze. W roku 1908 otrzymał Nagrodę Nobla w dziedzinie chemii za prace nad radioaktywnością. To mogłoby stanowić piękne zwieńczenie kariery dla większości ludzi, ale nie dla Rutherforda. Teraz dopiero na poważnie zabrał się do pracy.

Nie sposób mówić o Rutherfordzie nie wspominając o Laboratorium im. Cavendisha, utworzonym w roku 1874 jako placówka badawcza na Uniwersytecie w Cambridge. Jego pierwszym dyrektorem był Maxwell (teoretyk kierujący laboratorium?), drugim lord Rayleigh, a po nim nastąpił w 1884 roku Thomson. Rutherford przybył z nowozelandzkich stepów jako doktorant w roku 1895, w fantastycznym okresie bogatym w odkrycia. Jednym z głównych czynników, od którego zależy odniesienie sukcesu zawodowego w

¹ Ellis nie był w ścisłym tego słowa znaczeniu odkrywcą rozpadu β . Przyczynił się natomiast do rozwiązania zagadki bilansu energetycznego związanego z tym zjawiskiem (przyp. red.).

fizyce, jest szczęście. Bez niego nie ma co marzyć o sukcesie. Rutherford miał dużo szczęścia. Badania poświęcone nowo odkrytemu zjawisku radioaktywności - zwanej wówczas promieniami Becquerela - doprowadziły go w 1911 roku do najważniejszego spośród jego dokonań: do odkrycia jądra atomowego. Wydarzyło się to na Uniwersytecie w Manchesterze, skąd okryty chwałą powrócił do Laboratorium im. Cavendisha, gdzie zastąpił Thomsona na stanowisku dyrektora.

Przypomnijmy, że odkrywając elektron, Thomson poważnie zagmatwał zagadnienie budowy materii. Chemiczny atom, o którym sądzono, że jest niepodzielną cząstką postulowaną jeszcze przez Demokryta, teraz zaludnił się jakimiś ruchliwymi stworkami. Miały one - elektrony - ujemny ładunek, co czyniło sytuację tym bardziej kłopotliwą, bo materia w całości nie jest ani dodatnio, ani ujemnie naładowana. Coś zatem musi neutralizować elektrony.

Dramatyczna historia zaczyna się zupełnie prozaicznie. Szef wchodzi do laboratorium. Siedzi tam stażysta Hans Geiger i szczególnie wytrwały student Ernest Marsden. Zajęci są badaniem rozpraszania cząstek α . Radioaktywne źródło, powiedzmy radon 222, naturalnie i spontanicznie wysyła cząstki α . Są one po prostu atomami helu pozbawionymi przynależnych im elektronów - czyli jądrami helu, co Rutherford ustalił w 1908 roku. Radon, czyli źródło, znajduje się w ołowianym pojemniku z niewielkim otworem, pozwalającym skierować cząstki α w stronę cieniutkiej złotej folii. Gdy cząstki α przechodzą przez folię, ich tory ulegają ugięciu na skutek oddziaływania z atomami złota. Eksperyment miał określić kąty tego ugięcia. Był to zaplanowany przez Rutherforda historyczny prototyp doświadczenia poświęconego rozpraszaniu, które na tym właśnie polega: bombarduje się tarczą cząstkami i obserwuje, w jakim kierunku się odbijają. W tym wypadku cząstki α odgrywały rolę małych sond, których zadaniem było zbadanie struktury atomów. Tarczę ze złotej folii otaczały ze wszystkich stron ekrany pokryte siarczkiem cynku. Gdy cząstka α uderza w cząsteczkę tego związku, pojawia się błysk światła, co pozwala badaczom określić kąt odbicia. Cząstka α wpada w złotą folię, uderza w atom, odbija się od niego i uderza w jeden z ekranów pokrytych siarczkiem cynku. Błysk! Tory większości cząstek są tylko nieznacznie odchyłone od pierwotnego kierunku ruchu. Uderzają w ekran bezpośrednio za złotą folią. To był trudny eksperyment. Nie mieli jeszcze licznika cząstek - Geiger nie zdążył go jeszcze wymyślić - więc Geiger i Marsden musieli siedzieć godzinami w ciemności, adaptując wzrok, by zauważać błyski. Musieli dostrzec i opisać położenie małych iskierek.

Rutherford - który nie musiał siedzieć w ciemni, bo przecież był szefem - powiedział: „Zobaczcie, czy któreś cząstki α nie odbijają się od folii”. Innymi słowy, mieli sprawdzić, czy uderzając w folię, cząstki α nie odbijają się od niej i nie wracają w kierunku źródła. Marsden wspominał: „Ku memu zdziwieniu, udało mi się zaobserwować to zjawisko. [...] Powiedziałem o tym potem Rutherfordowi, gdy spotkałem go na schodach wiodących do jego gabinetu”.

Dane opublikowane później przez Geigera i Marsdena głosiły, że jedna na 8000 cząstek α odbijała się od złotej folii. Słynna reakcja Rutherforda na tę wiadomość wyglądała w ten sposób: „To było chyba najbardziej niewiarygodne zdarzenie w moim życiu. To tak, jakby pocisk artyleryjski wielkiego kalibru, wystrzelony w kierunku serwetki, odbił się od niej i powrócił do strzelającego”.

Wydarzyło się to w maju 1909 roku. Na początku roku 1911 Rutherford - działający teraz jako fizyk teoretyk - rozwiązał problem. Przywitał swoich studentów szerokim

uśmiechem. „Wiem, jak wygląda atom, i rozumiem przyczyny silnego odbicia w kierunku źródła” - powiedział. W maju tego roku ukazał się artykuł, w którym Rutherford obwieścił istnienie jądra atomowego. To był koniec epoki. Atom chemiczny objawił się teraz jako twór złożony, a nie prosty; podzielny i zupełnie nie przypominający a-tomu. Był to początek nowej ery, ery fizyki jądrowej, i schyłek fizyki klasycznej - przynajmniej wewnątrz atomu.

Rutherford potrzebował osiemnastu miesięcy na przemyślenie problemu, który studenci fizyki rozwiązują obecnie na trzecim roku. Dlaczego fakt odbicia cząstek α wprawił go w tak wielkie zakłopotanie? Musiało to mieć związek z powszechnie przyjętym wówczas modelem atomu. Oto mamy masywną, dodatnio naładowaną cząstkę α nacierającą na atom złota i odbijającą się od niego. Według powszechnie panującego w roku 1909 przekonania, cząstka α powinna była przedrzeć się przez folię bez najmniejszych problemów, jak pocisk przez serwetkę, by posłużyć się porównaniem Rutherforda.

Ten „serwetkowy” model atomu pochodził jeszcze od Newtona, który mówił, że mechaniczną stabilność może zapewnić tylko wzajemne znoszenie się sił. Dlatego w stabilnym, godnym zaufania atomie elektryczne siły przyciągania i odpychania powinny się równoważyć. Teoretycy działający na przełomie wieków gorączkowo zabrali się do sporządzania odpowiednich modeli. Tak układali elektrony, by otrzymać stabilny atom. Wiadomo było, że atomy zawierają mnóstwo ujemnie naładowanych elektronów. Dlatego też atomy musiały mieć taką samą liczbę dodatnich ładunków rozmieszczonych w nie znany bliżej sposób. Skoro elektrony są bardzo lekkie, a atom ciężki, to albo muszą w nim być tysiące elektronów (żeby złożyły się na potrzebny ciężar), albo ciężar musi się kryć wśród ładunków dodatnich. Proponowano wiele różnych modeli atomów, ale najprzychylniej przyjęta została propozycja nie kogo innego tylko J. J. Thomsona, Pana Elektrona. Zwano ją modelem ciasta z rodzynekami. Według tego modelu, ładunek dodatni jest rozmieszczony równomiernie w całej objętości atomu, a w nim tkwią ładunki elektryczne, niczym rodzyнки w cieście. Taka konstrukcja wydawała się mechanicznie stabilna, a nawet dopuszczała lekkie drgania elektronów wokół położenia równowagi. Tylko że natura dodatniego ładunku nadal pozostawała tajemnicą.

Rutherford natomiast obliczył, że tak silne odbicia cząstek α można wyjaśnić jedynie przy założeniu, że cała masa i dodatni ładunek atomu skoncentrowane są w bardzo niewielkiej objętości, w środku stosunkowo wielkiej kuli (o rozmiarach atomu). Jądro! Elektrony natomiast znajdowały się wewnątrz tej kuli. Z biegiem czasu i w miarę napływu coraz dokładniejszych danych udoskonalano teorię Rutherforda. Centralnie położony dodatni ładunek zajmuje nie więcej niż bilionową część objętości atomu. Według modelu Rutherforda, materia składa się głównie z pustej przestrzeni. Stół uderzony dłonią wydaje się nam twardy na skutek istnienia sił elektrycznych i reguł kwantowych, działających na poziomie atomowym i molekularnym. Atom to przede wszystkim próżnia. Arystoteles byłby zdegustowany.

Łatwiej będzie nam zrozumieć zaskoczenie Rutherforda na wieść o odbitych cząstkach α , gdy porzucimy jego militarne porównanie i wyobrazimy sobie kulę toczącą się z hukiem w kierunku kręgli. Jakież byłoby przerażenie gracza, gdyby taka kula, dotoczywszy się do gromadki kręgli, zatrzymała się i ruszyła z powrotem w jego kierunku! Zapewne zmykałby przed nią ile sił w nogach. Czy to możliwe? No cóż, załóżmy, że jeden z kręgli jest wyjątkowym „tłustym kręglem”, sporządzonym z czystego irydu, najcięższego ze znanych metali. Ten kręgiel jest bardzo ciężki, waży 50 razy więcej niż

kula. Seria zdjęć zrobionych z zastosowaniem niezwykle szybkiej migawki ukazałaby następujący przebieg wypadków: kula zderza się z kręglem, deformuje go, ale się zatrzymuje. Potem kręgiel powraca do pierwotnego kształtu, a nawet trochę się wyrzuca i zwraca kuli otrzymaną dawkę energii, która sprawia, że kula zaczyna się poruszać w przeciwnym niż dotąd kierunku. Na tym właśnie polega każde sprężyste zderzenie, ot, choćby kuli bilardowej z bandą. Obrazowe militarne porównanie Rutherforda zrodziło się z żywionego przez niego i większość jemu współczesnych przekonania, że atom był kulą ciasta starannie rozłożonego w wielkiej objętości. W przypadku atomu złota byłaby to „ogromna” kula o promieniu 10^{-9} metra.

Aby poglądowo przedstawić atom Rutherforda, wyobraźmy sobie jądro wielkości ziarna zielonego groszku (około pół centymetra). Atom jest kulą o promieniu 100 metrów. Można by w nim zawrzeć sześć boisk do piłki nożnej ułożonych koło siebie tak, by tworzyły z grubsza kwadrat.

Także i przy tym eksperymencie szczęście dopisało Rutherfordowi. Tak się złożyło, że jego radioaktywne źródło emitowało cząstki α o energii sięgającej 5 milionów elektronowoltów (zapisujemy to: 5 MeV), wprost idealnej dla odkrycia jądra. Była to energia dostatecznie mała, by cząstki α nie zbliżyły się zanadto do jądra, lecz zostały odepchnięte przez jego silny dodatni ładunek. Otaczająca jądro chmura elektronów miała zbyt małą masę, by wywrzeć jakikolwiek wpływ na bombardujące cząstki. Gdyby cząstki α miały znacznie większą energię, przeniknęłyby do wnętrza jądra i doznały silnego oddziaływania jądrowego (później pomówimy o tym szerzej), co w efekcie dałoby znacznie bardziej skomplikowany obraz ich rozpraszania. (Ogromna większość cząstek α przenikała przez atom w tak dużej odległości od jądra, że nie wywierało ono prawie żadnego wpływu na tor ich ruchu). Natomiast w omawianym wypadku, według pomiarów wykonanych przez Geigera i Marsdena, a potem potwierdzonych przez całe rzesze ich europejskich konkurentów, charakter rozpraszania cząstek α był matematycznie równoważny sytuacji, w której jądro byłoby punktem. Teraz wiemy, że jądra nie są punktami, ale gdy cząstki α nie zbliżają się do nich zanadto, można je za takie uważać - obliczenia są takie same.

Bošković byłby zadowolony. Doświadczenia w Manchesterze poparły jego teorię. Pola sił otaczające punktowe obiekty determinują wynik zderzenia. Eksperyment Rutherforda miał implikacje wykraczające daleko poza odkrycie jądra. Wykazał, że bardzo duże ugięcie toru wskazuje na obecność bardzo małych „punktowych” obiektów. Tę fundamentalną ideę zastosowano w końcu przy tropieniu kwarków - prawdziwych punktów. Model Rutherforda niewątpliwie stanowił punkt przełomowy. Przypominał miniaturowy Układ Słoneczny: gęste, dodatnio naładowane jądro, a wokół niego krąży pewna liczba elektronów, poruszających się po różnych orbitach. Liczba elektronów była taka, że ich całkowity ładunek równoważył dodatni ładunek jądra. Przywołano natychmiast Maxwella i Newtona. Elektron na orbicie, podobnie jak planety, posłuszny jest newtonowskiemu przykazaniu: $F = ma$. F było teraz siłą elektryczną (zgodnie z prawem Coulomba) występującą między dwiema cząstkami obdarzonymi ładunkiem elektrycznym. Skoro w tym prawie siła oddziaływania maleje z kwadratem odległości, podobnie jak w wypadku grawitacji, na pierwszy rzut oka można by przypuszczać, że elektrony poruszają się po określonych, stabilnych orbitach tak samo jak planety. No i proszę, elegancki planetarny model atomu chemicznego. Wszystko było w najlepszym porządku.

Wszystko było w najlepszym porządku aż do momentu, kiedy pojawił się w Manchesterze młody duński fizyk wyznania teoretycznego. „Nazywam się Bohr. Niels Henrik David Bohr, profesorze Rutherford. Jestem teoretykiem i przybyłem tu, by panu pomóc”. Możemy tylko wyobrazić sobie reakcję gruboskórnego, opryskliwego Nowozelandczyka.

Zmagania

Ewoluująca rewolucja znana pod nazwą teorii kwantowej nie wyskoczyła nagle w gotowej postaci z głów teoretyków. Z wolna wyłaniała się z danych coraz dokładniej opisujących chemiczny atom. Zmagania, które zakończyły się zrozumieniem budowy atomu, można potraktować jako wprawkę, trening przed prawdziwymi zawodami: poszukiwaniem wiedzy o głębszej strukturze atomu, o subnuklearnej dżungli.

Zapewne błogosławieństwem jest to, że prawdziwy obraz rzeczywistego świata ukazuje się nam powoli i stopniowo. Co by zrobił Galileusz, czy choćby Newton, gdyby jakimś cudem miał dostęp do wszystkich danych otrzymywanych w Fermilabie? Mojemu koledze, wykładowcy na Uniwersytecie Columbia, bardzo młodemu, szalenie inteligentnemu, elokwentnemu i pełnemu entuzjazmu profesorowi, powierzono wyjątkowe zadanie: weź 40 studentów pierwszego roku, którzy zadeklarowali chęć specjalizowania się w fizyce i przygotuj dla nich dwuletni intensywny program nauczania. Jeden profesor, czterdzieścioro przyszłych fizyków, dwa lata. Eksperyment poniósł sromotną klęskę. Większość studentów ostatecznie wybrała inne kierunki studiów. Powód poznałem później, podczas rozmowy z jednym z absolwentów matematyki: „Mel był fantastyczny, był najwspanialszym moim nauczycielem. W ciągu tych dwóch lat zapoznaliśmy się nie tylko z normalnym programem: mechaniką klasyczną, optyką, elektrycznością i tak dalej; on otworzył nam okno na świat współczesnej fizyki, a nawet pozwolił nam rzucić okiem na problemy, którymi się zajmował we własnej pracy badawczej. Czułem, że w żaden sposób nie potrafię sobie poradzić z tak trudnymi zagadnieniami, więc przenieśliśmy się na matematykę”.

W tym miejscu należy podjąć głębszy problem: czy mózg ludzki kiedykolwiek będzie przygotowany na to, by pojąć tajemnice fizyki kwantowej, które także i dziś nie dają spokoju wielu znakomitym fizykom. Teoretyk Heinz Pagels (tragicznie zmarły parę lat temu podczas wysokogórskiej wspinaczki) w swej znakomitej książce *The Cosmic Code (Kosmiczny kod)* sugerował, że być może ludzki mózg nie jest dostatecznie rozwinięty, aby pojąć kwantową rzeczywistość. Być może ma rację, choć wydaje się, że paru jego kolegów jest przekonanych, iż są znacznie lepiej rozwinięci niż my wszyscy.

Ale najważniejsze jest to, że teoria kwantowa - szalenie wyrafinowana teoria, dominująca w latach dziewięćdziesiątych XX wieku - działa. Działa na poziomie atomowym i na poziomie molekularnym. Działa w odniesieniu do zagadnień fizyki ciała stałego, metali, izolatorów, półprzewodników, nadprzewodników i wszędzie tam, gdzie ją zastosowano. Z sukcesu teorii kwantowej wynika znaczna część dochodu narodowego brutto wytwarzanego w krajach uprzemysłowionych. Poza tym, co dla nas w tej chwili jest istotniejsze, to jedyne dostępne narzędzie, z którym możemy podążać w głąb jądra, do jego części składowych, a nawet jeszcze głębiej - do niezmierzonej mikroskopijności pierwotnych form materii, gdzie staniemy w obliczu a-tomu i Boskiej Cząstki. To wła-

śnie tam trudności pojęciowe, jakich nastęrcza nam teoria kwantowa, a które większość fizyków zbywa jako „zwyčajną filozofię”, mogą odegrać znaczącą rolę.

Bohr: na skrzydłach motyla

Swego odkrycia Rutherford dokonał już po kilku innych eksperymentach, których wyniki wyraźnie przeczyły fizyce klasycznej; był to zatem dla niej ostatni gwóźdź do trumny. W nieustającym współzawodnictwie między doświadczeniem a teorią byłaby to odpowiednia dla eksperymentatorów chwila, by rzec: „Co jeszcze mamy wam, teoretykom, udowodnić, zanim wreszcie pojmiecie, że potrzeba czegoś nowego?” Wydaje się, że Rutherford nie zdawał sobie sprawy, jak wielkich zniszczeń miał dokonać w fizyce klasycznej jego nowy atom.

I wtedy pojawił się Niels Bohr, który miał przy Rutherfordzie odegrać tę samą rolę, jaką Maxwell pełnił przy Faradayu, a Kepler - przy Brahem. W Anglii Bohr trafił najpierw na Uniwersytet w Cambridge, gdzie współpracował z wielkim J. J. Thomsonem. Niestety, dwudziestopięciolatek wciąż irytował mistrza, wytykając mu błędy w jego książce. Jesienią 1911 roku, gdy studiował w Laboratorium im. Cavendisha jako stypendysta wytwórni Carlsberg Beer, Bohr usłyszał wykład Rutherforda poświęcony nowemu modelowi atomu. W swej pracy doktorskiej Bohr podjął temat „swobodnych” elektronów w metalach i zdawał sobie sprawę, że nie wszystko jest w porządku z fizyką klasyczną. Wiedział oczywiście o Plancku i o bardziej dramatycznym odstępstwie od klasycznej ortodoksji popełnionym przez Einsteina. Innym faktem wskazującym na kwantową naturę atomu były linie widmowe emitowane przez niektóre pierwiastki, gdy je podgrzewano. Wykład Rutherforda zrobił na Bohrze tak wielkie wrażenie, że w roku 1912 zorganizował sobie czteromiesięczny staż w Manchesterze.

Bohr dostrzegł prawdziwe znaczenie nowego modelu. Zdawał sobie sprawę, że aby pozostawać w zgodzie z równaniami Maxwella, elektrony poruszające się po kołowych orbitach musiałyby wypromieniowywać energię tak samo, jak elektrony drgające w antenie. Zgodnie z prawem zachowania energii orbita musiałaby się wówczas zmniejszać. Elektron w mgnieniu oka skończyłby swą podróż po spiralnym torze i wylądowałby na jądrze. Gdyby wszystkie te warunki były spełnione, mielibyśmy niestabilną materię. Planetary model prowadził do klasycznej katastrofy, a przecież nie było żadnej alternatywy.

Bohr nie miał wyboru, musiał spróbować czegoś zupełnie nowego. Najprostszy jest atom wodoru. Bohr zabrał się więc do studiowania wszystkich dostępnych danych - na przykład jak wodór spowalnia cząstki α - i stwierdził, że atom wodoru zawiera jeden elektron krążący po orbicie wokół dodatnio naładowanego jądra. Jeszcze inne niespodziewane własności pomogły mu zdecydować się na zerwanie z klasyczną teorią. Zauważył na przykład, że w fizyce klasycznej nie ma żadnych reguł determinujących wielkość promienia, po jakim elektron miałby się poruszać wokół jądra wodoru. W gruncie rzeczy Układ Słoneczny stanowi dobry przykład na to, że dozwolone są dowolne orbity planetarne. Zgodnie z prawami Newtona można sobie wyobrazić zupełnie dowolną orbitę, trzeba tylko ją odpowiednio „zapoczątkować”. Promień orbity jednoznacznie określa prędkość ruchu planety i okres obiegu wokół Słońca (rok). Ale wszystkie atomy wodoru są, jak się zdaje, identyczne. Atomy nie wykazują różnorodności obserwowanej w Ukła-

dzie Słonecznym. Bohr sformułował sensowne, choć absolutnie antyklasyczne twierdzenie, że w atomie dozwolone są tylko niektóre orbity. Postawił także tezę mówiącą, że elektron na tych szczególnych orbitach nie emituje energii. Biorąc pod uwagę historyczny kontekst, była to niewiarygodnie bezczelna hipoteza. Maxwell obracał się w grobie, ale Bohr tylko próbował jakoś zrozumieć fakty. Jeden istotny fakt dotyczył linii widmowych odkrytych przez Kirchhoffa parędziesiąt lat wcześniej. Rozżarzony wodór, tak jak i inne pierwiastki, emituje charakterystyczną serię linii widmowych. Bohr zrozumiał, że aby je otrzymać, musi pozwolić atomowi na swobodę wyboru między kilkoma rozmaitymi orbitami, odpowiadającymi różnym poziomom energetycznym. Przydzielił więc jednemu elektronowi atomu wodoru zbiór dozwolonych promieni reprezentujących coraz wyższe stany energetyczne. Próbując wyjaśnić linie widmowe, zaproponował (ni stąd, ni zowąd), że do wypromieniowania energii dochodzi wtedy, gdy elektron „przeskakuje” z jednego poziomu energetycznego na drugi, niższy, przy czym energia wypromieniowanego fotonu równa jest różnicy energii tych dwóch poziomów. Potem zaproponował zupełnie skandaliczną regułę, która miałaby określać te specjalne promienie orbit związane z poszczególnymi poziomami energetycznymi. Dozwolone są te orbity, powiedział, na których moment pędu - dobrze znana wielkość, mierząca orbitalny pęd elektronu - mierzony w nowych, kwantowych jednostkach przyjmuje wartość wyrażającą się liczbą całkowitą. Kwantowa jednostka Bohra nie była niczym innym jak tylko stałą Plancka h . Bohr powiedział później, że „to było nieuniknione, aby spróbować wykorzystać już istniejące pojęcia kwantowe”.

Co też ten Bohr robi po nocach w swoim pokoju na poddaszu z plikiem czystych kartek, ołówkiem, scyzorykiem, suwakiem logarytmicznym i paroma książkami? Poszukuje praw przyrody, zasad, które będą zgodne z faktami wymienionymi w książkach leżących na jego biurku. Jakim prawem wymyśla reguły rządzące zachowaniem niewidzialnych elektronów, które krążą wokół jąder (też niewidzialnych) atomów wodoru? Powodzenie w wyjaśnianiu danych doświadczalnych stanowiło ostateczne usprawiedliwienie dla jego poczynań. Bohr zaczyna od najprostszego atomu, wodoru. Zdaje sobie sprawę, że formowane przez niego reguły muszą mieć swe źródło w jakiejś głębszej zasadzie, ale zaczyna od reguł. Tak pracują teoretycy. Bohr w Manchesterze, by zacytować Einsteina, próbował poznać umysł Boga.

Bohr wkrótce powrócił do Kopenhagi, by pozwolić swej zarysowującej się teorii wykiełkować i okrzepnąć. Wreszcie w trzech artykułach opublikowanych w kwietniu, czerwcu i sierpniu 1913 roku (wielka trylogia) przedstawił światu swą kwantową teorię atomu wodoru: mieszaninę praw klasycznych i zupełnie arbitralnych twierdzeń, zestawionych najwyraźniej w ten sposób, by pozwalały otrzymywać poprawne wyniki. Manipulował swym modelem atomu tak, by wyjaśnić znany układ linii widmowych. Tabele zawierające te linie, serie liczb, zostały pracowicie zestawione przez następców Kirchhoffa i Bunsena, sprawdzone i potwierdzone w Sztrasburgu, Getyndze, Londynie oraz Mediolanie. Jakie liczby? Oto parę przykładowych dla atomu wodoru: $\lambda_1 = 4100,4$, $\lambda_2 = 4339,0$, $\lambda_3 = 4858,5$, $\lambda_4 = 6560,6$. (Żałujesz, że pytałeś? Nie martw się, nie ma potrzeby ich zapamiętywać).

Skąd się biorą te widmowe drgania? I dlaczego właśnie te, niezależnie od tego, ile energii dostarczona atomowi wodoru? Co dziwne, Bohr później minimalizował znaczenie linii widmowych: „Wydawało się, że widma są cudowne, ale nie można było dzięki nim pójść naprzód. To tak, jakby ktoś miał skrzydło motyla. Oczywiście, jest ono bardzo

piękne ze swymi regularnymi wzorami, ale nikomu przecież nie przyjdzie do głowy przypuszczać, że można określać zasady biologii na podstawie ubarwienia skrzydła motyla”. A jednak okazało się, że linie widma atomu wodoru - to motyle skrzydło - dostarczyły istotnej wskazówki.

Teoria Bohra została skonstruowana tak, by pozwalała otrzymywać liczby zgodne z danymi eksperymentalnymi. Podstawowym elementem analiz Bohra było nadrzędne pojęcie energii, zdefiniowane już za czasów Newtona, a potem jeszcze dopracowane i rozszerzone. Wykształcona osoba koniecznie musi mieć pojęcie o energii. Poświęćmy więc jej dwie minuty.

Dwie minuty dla energii

Wśredniej szkole dowiadujemy się, że ciało o określonej masie poruszające się z pewną prędkością ma energię kinetyczną (energię z powodu ruchu). Ciała miewają także energię ze względu na to, gdzie się znajdują. Stalowa kula na szczycie wieżowca ma energię potencjalną, bo ktoś musiał się napracować, by ją tam umieścić. Gdyby ją stamtąd zrzuciono, potencjalna energia spadającej kuli ulegnie przemianom w energię kinetyczną.

Jedyną interesującą rzeczą dotyczącą energii jest to, że zawsze zostaje zachowana. Wyobraźmy sobie złożony system zawierający miliardy atomów gazu. Wszystkie te atomy gwałtownie się poruszają, zderzają się ze ściankami naczynia i ze sobą nawzajem. Niektóre atomy zyskują energię, inne ją tracą, ale całkowita energia nie ulega zmianie. Dopiero w XIX wieku uczeni odkryli, że ciepło jest formą energii. Substancje chemiczne mogą uwalniać energię w reakcjach, takich jak na przykład spalanie węgla. Mogą się zmieniać i, w rzeczy samej, nieustannie się zmieniają postacie, w jakich przejawia się energia. Dziś znamy wiele jej rodzajów: mechaniczną, termiczną, chemiczną, elektryczną i jądrową. Wiemy, że masa może być przekształcona w energię *via* $E = mc^2$. Pomimo tak skomplikowanego obrazu, wciąż jesteśmy na sto procent pewni, że w złożonych przemianach całkowita energia (łącznie z masą) zawsze pozostaje niezmienna. Przykład: klocek zsuwa się po gładkiej powierzchni. Zatrzymuje się. Jego energia kinetyczna uległa zmianie w ciepło, które ujawniło się w postaci nieznacznie podwyższonej temperatury powierzchni. Przykład: napełniasz benzyną bak samochodu. Wiesz, że kupujesz 48 litrów energii chemicznej (mierzonej w dżulach), którą możesz zużyć, by nadać swej toyocie określoną energię kinetyczną. Benzyna znika, ale jej energia jest odpowiedzialna za przebycie 500 kilometrów. Energia jest zachowana. Przykład: wodospad uderza w wirnik generatora, przeobrażając naturalną energię potencjalną wody w energię elektryczną potrzebną do oświetlenia i ogrzania odległego miasta. W rejestrze przyrody wszystko musi się zgadzać. Na końcu masz dokładnie tyle samo co na początku.

No więc?

No dobrze, ale co to wszystko ma wspólnego z atomem? Według modelu Bohra, elektron musi się ograniczać do specyficznych orbit. Każdą orbitę określa wielkość jej promienia. Każdy z dozwolonych promieni odpowiada określonemu stanowi energetycz-

nemu (poziomowi energetycznemu) atomu. Najmniejszy promień odpowiada najniższej energii i zwany jest stanem podstawowym. Jeśli dostarczymy pewnej objętości gazu wodorowego energię, jej część zostanie zużyta na rozhuśnięcie atomów - zaczną się szybciej poruszać. Jednak ściśle określona porcja energii (pamiętasz, drogi Czytelniku, efekt fotoelektryczny?) może zostać wchłonięta przez atom i wtedy elektron osiągnie wyższy poziom energetyczny na orbicie o większym promieniu. Poziomy energetyczne są ponumerowane 1, 2, 3, 4, ..., a każdy z nich ma energię E_1, E_2, E_3, E_4 i tak dalej. Bohr tak skonstruował swą teorię, by było w niej miejsce dla koncepcji Einsteina, według której energia fotonu determinuje jego długość fali.

Jeśli fotony o rozmaitych długościach fali padają na atom wodoru, to w końcu elektron połknie odpowiedni foton (porcję światła o określonej energii) i przeskoczy z E_1 na E_2 albo może na E_3 . W ten sposób dochodzi do zaludniania wyższych poziomów energetycznych w atomie. To właśnie dzieje się w świetlówce. Gdy świetlówka podłączona jest do prądu elektrycznego, jarzy się charakterystycznym dla wodoru blaskiem. Energia sprawia, że niektóre z elektronów należących do miliardów atomów przeskakują na wyższy poziom energetyczny. Jeśli dopływa dostatecznie dużo energii elektrycznej, elektrony wielu atomów będą zajmowały wszystkie możliwe wyższe poziomy energetyczne.

Zgodnie z koncepcją Bohra, elektrony znajdujące się na wyższych poziomach energetycznych spontanicznie zeskakują na niższe. Przypomnij sobie, drogi Czytelniku, nasz mały wykład o zachowaniu energii. Jeśli elektrony zeskakują, to tracą energię i trzeba się z niej jakoś rozliczyć. Bohr mówi: „Nie ma problemu”. Zeskakujący elektron emituje foton o energii równej różnicy energii orbit. Jeśli na przykład zeskakuje z poziomu 4 na 2, to energia fotonu równa się $E_4 - E_2$. Możliwych jest wiele przeskoków, na przykład $E_2 \rightarrow E_1, E_3 \rightarrow E_1, E_4 \rightarrow E_1$. Dozwolone są także wielostopniowe skoki, takie jak $E_4 \rightarrow E_2$, a potem $E_2 \rightarrow E_1$. Każda zmiana energii kończy się emisją fotonu o odpowiedniej długości fali, stąd też można obserwować serie linii widmowych.

To formowane ad hoc, quasi-klasyczne objaśnienie atomu zaproponowane przez Bohra było wirtuozowskim, acz nieortodoksyjnym popisem. Korzystał on z teorii Newtona i Maxwella wtedy, gdy było mu to na rękę, pomijał je wtedy, gdy przeszkadzały. Podobnie z Planckiem i Einsteinem. Wszystko to razem wyglądało skandalicznie, ale Bohr był bystry i otrzymał poprawne wyniki.

Powtórzmy. W XIX wieku dzięki pracom takich uczonych, jak Fraunhofer i Kirchhoff, poznaliśmy linie widmowe. Dowiedzieliśmy się, że atomy i cząsteczki emitują i pochłaniają promieniowanie o określonej długości fali i że każdy atom ma swój własny, charakterystyczny zestaw takich długości. Dzięki Planckowi uświadomiliśmy sobie, że światło jest wysyłane porcjami - że jest skwantowane. Hertz i Einstein wykazali, że światło jest także pochłaniane porcjami. Thomson odkrył elektron. Dzięki Rutherfordowi dowiedzieliśmy się, że atom składa się z maleńkiego jądra, mnóstwa próżni i rozproszonych tu i ówdzie elektronów. Dzięki moim rodzicom ja dowiedziałem się o tym wszystkim. Bohr poskładał te i wiele innych danych w jedną całość. Elektrony mogą się poruszać tylko po określonych orbitach - powiedział Bohr. Absorbują skwantowaną energię, co zmusza je do przeskakiwania na wyższe orbity. Zeskakując z powrotem na niższe orbity, emitują fotony - kwanty światła. Można je obserwować w postaci fal o określonej długości jako linie widmowe charakterystyczne dla każdego pierwiastka.

O teorii Bohra rozwijanej w latach 1913-1925 mówi się dziś „stara teoria kwantowa”. Planck, Einstein i Bohr - każdy z nich po trochu przyczynił się do uśmiercenia kla-

sycznej fizyki i każdy z nich korzystał z solidnych danych eksperymentalnych utwierdzających ich w przekonaniu, że mają słuszość. Teoria Plancka pięknie zgadzała się z widmem ciała doskonale czarnego, Einsteina - z dokładnymi pomiarami zjawiska fotoelektrycznego. We wzorze matematycznym ułożonym przez Bohra można znaleźć takie wielkości, jak ładunek elektryczny i masę elektronu, stałą Plancka, kilka π , zwykle liczby, jak na przykład 3, i ważną liczbę całkowitą (liczbę kwantową), numerującą kolejne stany energetyczne. Wszystko to razem składało się na wzór, za pomocą którego można obliczyć całe bogactwo linii widmowych atomu wodoru. Była to zaiste imponująca zgodność z danymi eksperymentalnymi.

Teoria Bohra bardzo się spodobała Rutherfordowi, ale interesowało go przede wszystkim, kiedy i jak elektron postanawia przeskoczyć na niższy poziom energetyczny; Bohr nie wspominał o tym ani słowem. Rutherford pamiętał wcześniejszą zagadkę: kiedy radioaktywny atom decyduje się na rozpad? W fizyce klasycznej każde działanie ma swoją przyczynę. Wydaje się, że w królestwie atomu nie pojawia się ten rodzaj związków przyczynowych. Bohr zdawał sobie sprawę z tej trudności (która nie została rozwiązana aż do roku 1916, kiedy ukazała się praca Einsteina poświęcona „przejściom spontanicznym”) i wskazał kierunek przyszłym badaniom. Ale eksperymetatorzy, wciąż badający zjawiska światła atomowego, znaleźli parę rzeczy, których Bohr się nie spodziewał.

Gdy amerykański fizyk Albert Michelson, fanatyk precyzji, dokładniej przyjrzał się liniom widmowym atomu wodoru, zauważył, że każda z nich była tak naprawdę dwiema bardzo blisko siebie położonymi liniami - dwiema minimalnie różniącymi się długościami fal. To rozdwojenie linii oznacza, że gdy elektron jest gotowy do skoku w dół, ma do wyboru dwa różne, niższe stany energetyczne. Model Bohra nie przewidywał takiego rozdwojenia, zwanego strukturą subtelną.

Arnold Sommerfeld, współpracownik Bohra, zauważył, że prędkość, z jaką porusza się elektron w atomie wodoru, stanowi znaczny ułamek prędkości światła, a zatem powinna być traktowana zgodnie z einsteinowską teorią względności z roku 1905. Po uwzględnieniu efektów relatywistycznych Sommerfeld zorientował się, że tam, gdzie teoria Bohra przewidywała jedną orbitę, według nowej teorii powinny istnieć dwie, bardzo blisko siebie położone orbity. To wyjaśniało rozdwojenie linii. Podczas wykonywania swych obliczeń Sommerfeld wprowadził „nowy skrót” na oznaczenie pewnych, często pojawiających się, kombinacji stałych występujących w równaniach. Chodzi o wyraz $2\pi e^2/hc$, który zastąpił grecką literą alfa (α). Nie przejmuj się, drogi Czytelniku, równaniem, chodzi nam tylko o to, że kiedy podstawisz znane wartości za ładunek elektronu e , stałą Plancka h i prędkość światła c , pojawia się wynik: $\alpha = 1/137$. Znowu to 137, liczba, za którą nie stoi żadna jednostka fizyczna.

Experymetatorzy nieustannie dorzucali nowe szczegóły do atomowego modelu Bohra. W roku 1896, przed odkryciem elektronu, Holender Pieter Zeeman ustawił palnik Bunsena między biegunami silnego magnesu, a w płomieniu umieścił grudkę soli kuchennej. Za pomocą bardzo czułego spektrometru własnej konstrukcji badał żółte światło emitowane przez sól. No i masz: w polu magnetycznym żółte linie widmowe zrobiły się szersze, co oznaczało, że pole magnetyczne ma zdolność rozszczepiania linii. Efekt ten potwierdzano w jeszcze dokładniejszych pomiarach aż do roku 1925, kiedy to dwaj Holendrzy, Samuel Goudsmit i George Uhlenbeck, wystąpili z dziwną sugestią, że tylko nadanie elektronowi nowej własności, zwanej spinem, pozwala wyjaśnić ten efekt.

W świecie fizyki klasycznej mamy czasami do czynienia z obiektami takimi na przykład jak wirujący bąk, które obracają się wokół swej osi symetrii. Spin elektronu jest tego kwantowym odpowiednikiem.¹

Wszystkie te nowe idee, choć same w sobie uzasadnione, były dość niezgrabnie doczepione do modelu atomu Bohra z 1913 roku. Wyekwipowana w ten sposób i znacznie rozszerzona teoria Bohra mogła z powodzeniem służyć do wyjaśniania imponującej liczby precyzyjnie i przemyślnie otrzymanych danych eksperymentalnych.

Istniał tylko jeden problem. Ta teoria była błędna.

Uchylenie rąbka tajemnicy

Łatana teoria zapoczątkowana przez Nielsa Bohra w 1912 roku napotykała coraz większe trudności, gdy pewien francuski doktorant odkrył bardzo istotny trop. Trop ów wyróżnił się z nietypowego źródła - napiszonej prozy dysertacji doktorskiej - i w ciągu trzech bogatych w wydarzenia lat doprowadził do wypracowania zupełnie nowej wizji mikroświata. Autorem rozprawy był młody arystokrata, książę Louis Victor de Broglie, w pocie czoła pracujący nad doktoratem. Zainspirował go artykuł Einsteina, który w roku 1909 snuł rozważania nad znaczeniem kwantowej teorii światła. Jak to możliwe, by światło zachowywało się jak rój porcji energii - to znaczy jak cząstki - a jednocześnie wykazywało wszystkie cechy charakterystyczne dla fal, takie jak interferencja, dyfrakcja oraz inne własności, których warunkiem jest istnienie fali o określonej długości.

De Broglie pomyślał, że ten dziwny, podwójny charakter światła może stanowić fundamentalną własność przyrody i że można by ją także wykorzystać przy wyjaśnianiu zachowania ciał materialnych takich jak elektron. W swej teorii zjawiska fotoelektrycznego Einstein, idąc śladem Plancka, przypisał kwantowi światła określoną energię, pozostającą w ścisłym związku z jego długością fali czy częstotliwością. Teraz de Broglie przywołał nową symetrię: jeśli fale mogą być cząstkami, to cząstki (elektrony) mogą być falami. Obmyślił sposób pozwalający na przypisanie elektronowi długości fali związanej z jego energią. Jego koncepcja z miejsca okazała się skuteczna w odniesieniu do atomu wodoru: pozwoliła wyjaśnić sformułowaną ad hoc tajemniczą regułę Bohra, według której dozwolone są tylko pewne promienie orbit. Teraz to jest zupełnie oczywiste. Czy tak? No jasne! Jeśli elektron na bohrowskiej orbicie potraktujemy jako falę o długości maciupeńkiej części centymetra, to dozwolone będą tylko te orbity, których obwód stanowi całkowitą wielokrotność tej długości fali. Żeby to sobie lepiej wyobrazić, przeprowadźmy proste doświadczenie. Przynieś, drogi Czytelniku, trochę monet: złotówkę i garść groszków. Połóż na stole złotówkę (jądro), a wokół niej ułóż kilka groszków (orbita elektronu). Stwierdzisz, że potrzebujesz osiem groszy na zrobienie najmniejszej orbity. W ten sposób masz także jednoznacznie określony promień tej orbity. Jeśli chcesz użyć dziewięć groszy, musisz ułożyć większy okrąg, ale nie jakikolwiek większy okrąg: istnieje tylko jedna odpowiednia wielkość promienia. Na okręgach o większym promieniu zmieści się większa liczba groszy - dziesięć, jedenaście albo jeszcze więcej. Ten prosty przykład pokazuje, że jeśli ograniczymy się do całych groszy - całkowitych długości fali - to dozwolone są tylko pewne określone wartości promienia. Aby utworzyć inne okręgi, trzeba

¹ Po angielsku *to spin* oznacza „wirować, kręcić się” (przyp. tłum.).

by układać monety na zakładkę, lecz jeśli mają one reprezentować długość fali, to fala taka nie zamknęłaby się na orbicie. Istota pomysłu de Broglie'a polegała na tym, by przypisać elektronowi długość fali, która jednoznacznie określi wielkość dozwolonego promienia.

W swej dysertacji de Broglie zastanawiał się, czy elektron mógłby wykazywać również inne własności falowe, takie jak interferencja i dyfrakcja. Jego paryscy promotorzy, choć byli pod wielkim wrażeniem wirtuozerii młodego księcia, czuli się nieco zakłopotani proponowaną przez niego koncepcją fal-cząstek. Jeden z egzaminatorów, poszukując niezależnej opinii kogoś z zewnątrz, wysłał kopię pracy de Broglie'a do Einsteina, który odpowiedział następującym komplementem: „On uchylił rąbka wielkiej tajemnicy”. Praca doktorska de Broglie'a została przyjęta w roku 1924 i niedługo potem przyniosła mu Nagrodę Nobla (co czyni go pierwszym i, jak dotąd, ostatnim fizykiem, któremu przyznano tę nagrodę za rozprawę doktorską). Jednak głównym zwycięzcą był Erwin Schrödinger, który pierwszy dostrzegł prawdziwe możliwości ukryte w pracy de Broglie'a.

Nadeszła pora na interesujące *pas de deux* teorii i eksperymentu. Pomysł de Broglie'a nie miał żadnego wsparcia doświadczalnego. Fala elektronu? Co to znaczy? Przełom nastąpił w roku 1927 w stanie New Jersey. W Bell Telephone Laboratories, słynnej przemysłowej instytucji badawczej, zajmowano się badaniami elektronowych lamp próżniowych - antycznych urządzeń elektronicznych używanych, zanim jeszcze nadszedł świt cywilizacji i wynaleziono tranzystory. Dwaj naukowcy, Clinton Davisson i Lester Germer, bombardowali strumieniami elektronów powierzchnie rozmaitych metali pokryte tlenkami. Pracując pod kierunkiem Davissona, Germer zauważył dziwny rozkład elektronów odbitych od pewnych metali pozbawionych tlenkowej powłoki.

W roku 1926 Davisson pojechał do Anglii na sympozjum, gdzie usłyszał o koncepcji de Broglie'a. Pospieszył z powrotem do Laboratorium Bella i zabrał się do analizowania zgromadzonych danych w poszukiwaniu falowych zachowań. Wyniki doświadczeń doskonale pasowały do teorii elektronów zachowujących się jak fale, których długość zależy od energii bombardujących cząstek. Davisson i Germer pośpiesznie przygotowali artykuł i ledwie zdążyli z opublikowaniem go: w Laboratorium im. Cavendisha George P. Thomson, syn sławnego J. J. Thomsona, prowadził podobne badania. Davisson i Thomson otrzymali Nagrodę Nobla w 1938 roku za zaobserwowanie po raz pierwszy fali elektronów.

Na marginesie warto dodać, że silne więzi rodzinne łączące Josepha Johna z George'em są obficie udokumentowane w ich pełnej ciepła korespondencji. W jednym z bardziej wylewnych listów G. P. pisał:

„Drogi Ojcze,
Rozważmy trójkąt sferyczny ABC...
[i po trzech gęsto zapisanych stronach na ten temat]
Twój syn, George”.

A zatem fala jest związana z elektronem, czy to uwięzionym w antenie, czy podróżującym w lampie próżniowej. Cóż jednak faluje w tym elektronie?

Człowiek, który nie znał się na bateriach

Jeśli Rutherford był archetypem eksperymentatora, Wernera Heisenberga (1901-1976) należałoby potraktować jako jego teoretycznego odpowiednika. Heisenberg spełniałby definicję I. I. Rabiego, według której teoretyk to ktoś, kto „nie potrafi zasznurować własnych butów”. Werner był jednym z najzdolniejszych studentów w Europie, choć niewiele brakowało, by oblał egzamin doktorski na Uniwersytecie w Monachium. Nie spodobał się jednemu z egzaminatorów: Wilhelmowi Wienowi, pionierowi badań nad promieniowaniem ciała doskonale czarnego. Wien zaczął zadawać Heisenbergowi praktyczne pytania, na przykład: jak działają baterie. Heisenberg nie miał o tym pojęcia. Wien przypiekał go trochę podobnymi pytaniami i chciał go oblać, ale przeważało zdanie rozsądniejszych członków komisji i przepuszczono Heisenberga z wynikiem dostatecznym.

Ojciec Heisenberga wykładał w Monachium grekę. Już jako nastolatek Werner czytał dialog *Timaios*, w którym zawarta jest platońska koncepcja atomistyczna. Młodego uważał, że Platon to dziwak - jego atomy były maleńkimi sześcianikami i ostrosłupami - ale zafascynowała go idea Platona, według której nie można zrozumieć Wszechświata, dopóki nie pozna się najmniejszych składników materii. Werner postanowił poświęcić życie badaniu najmniejszych cząstek materii.

Heisenberg usilnie próbował wyobrazić sobie atom Rutherforda-Bohra, ale zupełnie mu się to nie udawało. Nie potrafił wyobrazić sobie bohrowskich orbit. Uroczy mały atomek, który przez wiele lat stanowił symbol Komisji Energii Atomowej - jądro z elektronami, które pomykają wokół niego po magicznych orbitach, lecz nie wypromieniowują energii - był po prostu bez sensu. Heisenberg zdawał sobie sprawę, że orbity Bohra należy traktować jako teoretyczne konstrukcje, które sprawiają, iż można otrzymywać liczby zgodne z wynikami eksperymentów i pozbyć się - a raczej prześlizgnąć się nad nimi - klasycznych zarzutów stawianych modelowi Rutherforda. Ale prawdziwe orbity? Nie, teoria kwantowa Bohra nie pozbyła się bagażu klasycznej fizyki w dostatecznym stopniu. Sposób, w jaki przestrzeń wokół atomu pozwalała na istnienie jedynie wybranych orbit, wymagał bardziej radykalnego podejścia. Heisenberg zdał sobie sprawę, że ten nowy atom był w gruncie rzeczy zupełnie niewyobrażalny. Przyjął więc sztywną zasadę: nie zajmować się niczym, czego nie można zmierzyć. Nie można zmierzyć orbit elektronów, ale linie widmowe można. Heisenberg sformułował teorię, zwaną mechaniką macierzową, polegającą na obliczaniu wyrażeń matematycznych, zwanych macierzami. Metoda ta była trudna matematycznie i jeszcze trudniejsza do wyobrażenia, ale stało się jasne, że w sposób istotny ulepszała starą teorię Bohra. Z czasem mechanika macierzowa odniosła wszystkie sukcesy teorii Bohra bez odwoływania się do magicznego promienia orbity. Macierze Heisenberga sprawdziły się nawet tam, gdzie zawodziła stara teoria. Niestety, fizycy mieli trudności ze stosowaniem rachunku macierzowego.

I wtedy nadeszły najsłynniejsze wakacje w historii fizyki.

Fale materii i dama w willi

Kilka miesięcy po tym, jak Heisenberg sformułował swoją macierzową mechanikę kwantową, Erwin Schrödinger stwierdził, że przydałby mu się urlop. Było to mniej więcej na dziesięć dni przed Bożym Narodzeniem 1925 roku. Schrödinger był kompetentnym, choć nie wyróżniającym się profesorem na Uniwersytecie w Zurychu, a wszystkim nauczycielom akademickim należy się przerwa świąteczna. Ale nie były to zwykłe wakacje.

Schrödinger zarezerwował willę w Alpach Szwajcarskich na dwa i pół tygodnia. Został w domu żonę, a z sobą zabrał notatniki, dwie perły i swoją wiedeńską przyjaciółkę. Miał zamiar uratować rozłazącą się w szwach ówczesną teorię kwantową. Fizyk umieścił sobie perły w uszach, by odgrodzić się od rozpraszających hałasów, a przyjaciółkę w łóżku, by była mu natchnieniem. Zmierzył się z zadaniem wprost dla niego stworzonym. Musiał wymyślić nową teorię i zadowolić panią. Na szczęście ze wszystkim sobie poradził. (Nawet nie myśl o zostaniu fizykiem, drogi Czytelniku, jeśli takie wymagania wydają ci się wygórowane).

Schrödinger zaczął swą karierę jako eksperymentator, ale dość wcześnie zwrócił się w stronę teorii. Jak na teoretyka był raczej stary - w święta 1925 roku kończył 38 lat. Oczywiście, kręci się po świecie sporo teoretyków w średnim wieku, a nawet podstarzałych, ale zazwyczaj najlepsze ich prace powstają przed trzydziestką. Potem teoretycy przechodzą na intelektualną emeryturę i zostają „starszymi dygnitarzami” fizyki. To zjawisko spadającej gwiazdy było szczególnie wyraźne w szczytowym okresie rozkwitu teorii kwantowej. Paul Dirac, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli i Niels Bohr jako bardzo młodzi ludzie sformułowali swe najświetniejsze dzieła. Dirac i Heisenberg pojechali do Sztokholmu po Nagrodę Nobla w towarzystwie swych mam. Dirac kiedyś napisał:

Wiek, oczywiście, jest czymś straszliwym,
Co nad fizykiem wisi jak bat.
Lepiej by umarł miast wciąż był żywym,
Kiedy już skończy trzydzieści lat.

(Nobla dostał za osiągnięcia w dziedzinie fizyki, a nie literatury). Szczęściem dla nauki, Dirac nie wziął sobie swego wiersza do serca i żył ponad osiemdziesiąt lat.

Jedną z rzeczy, które Schrödinger zabrał ze sobą na wakacje, był artykuł de Broglie'a o cząstkach i falach. Gorączkowo pracując, Schrödinger rozszerzył pojęcie kwantu. Nie tylko traktował elektrony jak cząstki o własnościach falowych, lecz ułożył równanie, w którym elektrony po prostu są falami - falami materii. Głównym bohaterem słynnego równania Schrödingera jest wielkość, oznaczona greckim symbolem psi (ψ). ψ znane jest jako funkcja falowa i obejmuje wszystko, co wiemy lub możemy wiedzieć o elektronie. Rozwiązując równanie Schrödingera, otrzymuje się wartość ψ zmienną w czasie i przestrzeni. Później równanie to zastosowano do układów składających się z wielu elektronów, a wreszcie do dowolnego systemu wymagającego kwantowego ujęcia. Innymi słowy, równanie Schrödingera, czyli mechanika falowa, ma zastosowanie w odniesieniu do atomów, cząsteczek, protonów, neutronów i - co dla nas dziś jest szczególnie istotne - do zlepek kwarków.

Schrödinger zamierzał wskrzesić fizykę klasyczną. Upierał się, że elektrony są zwykłymi falami, w klasycznym rozumieniu, tak samo jak fala dźwiękowa, fala na wodzie, czy maxwellowskie fale elektromagnetyczne i radiowe. Elektrony miały być falami materii, a ich cząsteczkowy aspekt czystą iluzją. Fale były już dość dobrze znane i łatwe do wyobrażenia, w przeciwieństwie do elektronów w atomie Bohra, skaczących ni stąd, ni zowąd z jednej orbity na drugą. W ujęciu Schrödingera ψ (a tak naprawdę, to ψ^2) opisywało gęstość rozkładu takiej fali materii. Jego równanie opisywało falę znajdującą się pod wpływem sił elektrycznych działających w atomie. Na przykład w atomach wodoru fale Schrödingera zagęszczają się w tych miejscach, w których stara teoria Bohra mówiła o orbitach. Wielkość promieni orbit wychodzi z równania automatycznie, bez żad-

nych poprawek. Ponadto równanie pozwala obliczać położenie linii widmowych nie tylko atomu wodoru, ale także innych pierwiastków.

Schrödinger opublikował równanie falowe w ciągu paru tygodni po opuszczeniu willi. Z miejsca wywołało ono sensację i stało się jednym z najpotężniejszych narzędzi matematycznych stosowanych do opisu struktury materii. (Do roku 1960 wydano ponad sto tysięcy publikacji naukowych korzystających z równania Schrödingera). W niedługim czasie Schrödinger opublikował jeszcze pięć artykułów. Wszystkie te artykuły, napisane w ciągu sześciu miesięcy, stanowią owoc jednego z najbardziej płodnych wybuchów twórczych w dziejach nauki. J. Robert Oppenheimer nazwał mechanikę falową „jedną z najdoskonalszych, najprecyzyjniejszych i najwdzięczniejszych teorii, jakie kiedykolwiek stworzono”. Arnold Sommerfeld, wybitny fizyk i matematyk, powiedział, że teoria Schrödingera „była najbardziej zadziwiającym ze wszystkich zadziwiających odkryć XX wieku”.

Dlatego też ja osobiście przebaczyłem już Schrödingerowi jego przygody miłosne, które ostatecznie powinny interesować tylko biografów, socjologizujących historyków nauki i zawistnych kolegów.

Fala prawdopodobieństwa

Fizycy pokochali równanie Schrödingera, bo potrafili je rozwiązywać i otrzymywali sensowne wyniki. Choć mechanika macierzowa Heisenberga także dawała poprawne rezultaty, większość fizyków wybrała metodę Schrödingera, która odwoływała się do starego i dobrze znanego równania różniczkowego. Parę lat później wykazano, że idee fizyczne i konsekwencje liczbowe obu teorii są identyczne. Ta sama treść została po prostu zapisana w dwóch różnych językach matematycznych. Dziś stosuje się najbardziej dogodną składankę elementów pochodzących z obu teorii.

Równanie Schrödingera stwarzało jednak pewien problem. Chodzi o to, że związana z nim interpretacja fali była błędna. Okazało się, że ψ nie może reprezentować fali materii. Bez wątplenia opisywało jakiś rodzaj fali, ale pytanie, co faluje, pozostawało bez odpowiedzi.

Problem rozwiązał niemiecki fizyk Max Born jeszcze w tym samym, obfitującym w wydarzenia, roku 1926. Born stwierdził, że jedyną sensowną interpretacją funkcji falowej Schrödingera jest uznanie, że ψ^2 reprezentuje prawdopodobieństwo znalezienia cząstki - elektronu - w rozmaitych miejscach. Wartość ψ^2 zmienia się w zależności od czasu i położenia w przestrzeni. Tam, gdzie ψ^2 jest duże, duże jest też prawdopodobieństwo znalezienia elektronu. Tam, gdzie ψ^2 wynosi zero, nigdy nie natrafimy na elektron. Funkcja falowa jest falą prawdopodobieństwa.

Na Borna wywarły wpływ eksperymenty, w których strumień elektronów zostaje skierowany w stronę pewnego rodzaju bariery energetycznej. Mogła nią być na przykład druciana siatka, podłączona do ujemnego bieguna baterii wytwarzającej napięcie, powiedzmy, 10 woltów. Jeśli energia elektronu jest większa niż energia bariery, to powinien ją przeskoczyć jak piłka przerzucona przez mur. Jeśli natomiast energia elektronu jest mniejsza niż energia bariery, to odbije się od niej jak piłka rzucona o mur. Jednak według kwantowego równania Schrödingera część fali przenika przez barierę, część zaś

zostaje odbita. Jest to zachowanie typowe dla światła. Przechodząc przed wystawą sklepową, zobaczymy rozłożone towary, ale także własny, niewyraźny wizerunek. Fale świetlne jednocześnie przenikają przez szybę i odbijają się od niej. Równanie Schrödingera przewiduje podobne rezultaty, tylko że nigdy nie zaobserwowaliśmy części elektronu!

Eksperyment wygląda następująco: w kierunku bariery wysyłamy 1000 elektronów. Liczniki Geigera pozwalają stwierdzić, że 550 z nich przemknęło przez barierę, a 450 zostało odbitych, lecz za każdym razem detektory wykrywają całkowite elektrony. Fale Schrödingera podniesione do kwadratu dają 550 i 450 jako wynik statystycznego przewidywania. Jeśli zaakceptujemy interpretację Borna, pojedynczy atom ma 55 procent szansy przeniknięcia przez barierę i 45 procent odbicia się od niej. Ponieważ poszczególny elektron nigdy się nie rozdziela, fala Schrödingera nie może być elektronem, może być tylko prawdopodobieństwem.

Born, podobnie jak Heisenberg, pochodził z getyńskiej szkoły fizyki, grupy skupiającej wielu najzdolniejszych uczonych tego okresu. Zawodowe i intelektualne życie tych ludzi związane było z Uniwersytetem w Getyndze. Statystyczna interpretacja równania Schrödingera, którą zaproponował Born, wynikała z przekonania panującego wśród członków tej grupy, że elektrony są cząstkami. Przecież sprawiają, że liczniki Geigera trzeszczą, zostawiają wyraźnie widoczne ślady w komorach mgłowych Wilsona, zderzają się z innymi cząstkami i odbijają się od nich. A tu mamy równanie Schrödingera, które dostarcza poprawnych odpowiedzi, ale traktuje elektron jako falę. Co zrobić, żeby przekształcić je w równanie opisujące cząstki?

Ironia jest nieodłączną towarzyszką historii; pomysł, który wszystko zmienił, został podany przez Einsteina (znowu!) w dość spekulatywnym artykule teoretycznym, opublikowanym w roku 1911. Einstein rozpatrywał związek fotonów z klasycznymi równaniami pola Maxwella. Zasugerował, że wielkości związane z polem kierowały fotony do obszarów o wysokim prawdopodobieństwie. Zaproponowane przez Borna rozwiązanie korpuskularno-falowego dylematu brzmiało po prostu: elektrony zachowują się jak cząstki przynajmniej podczas pomiaru, przy innych okazjach ich rozkład w przestrzeni jest zgodny z falową charakterystyką prawdopodobieństwa wynikającą z równania Schrödingera. Innymi słowy, funkcja ψ^2 opisuje prawdopodobne położenie elektronów. Prawdopodobieństwo to może zachowywać się jak fala. Schrödinger uporał się z najtrudniejszym zadaniem, formułując równanie stanowiące rdzeń teorii, ale to Born - zainspirowany przez Einsteina - odkrył, o czym to równanie naprawdę mówiło. Ironia losu tkwi w tym, że Einstein nigdy nie zaakceptował tej interpretacji funkcji falowej.

Co to znaczy, czyli fizyka kroju i szycia

Zaproponowana przez Borna interpretacja równania Schrödingera doprowadziła do najbardziej dramatycznej i najgłębszej przemiany naszego światopoglądu od czasów Newtona. Nic dziwnego, że Schrödinger uznał całą ideę za niemożliwą do przyjęcia i żałował, iż w ogóle stworzył równanie, które miało cokolwiek wspólnego z podobnymi niedorzecznościami. Jednak Born, Heisenberg, Sommerfeld i inni przyjęli tę ideę bez gadania, bo „prawdopodobieństwo wisiało już w powietrzu”. W swym artykule Born elokwentnie dowodził, że choć równanie przewiduje tylko prawdopodobieństwo, matema-

tyczna postać tego prawdopodobieństwa zmienia się w sposób całkowicie przewidywalny.

Zgodnie z tą nową interpretacją, równanie dotyczy fal prawdopodobieństwa ψ , które pozwalają przewidzieć, co robi elektron, jaka jest jego energia, dokąd zmierza itd. Jednak wszystkie te przewidywania mają postać prawdopodobieństwa. To ono właśnie jest tym falującym aspektem elektronu. Falowe rozwiązania równania mogą zgrupować się w jednym miejscu, składając się na wysokie prawdopodobieństwo, a znosić się w innym, by w efekcie dać małe prawdopodobieństwo. Chcąc sprawdzić te przewidywania, trzeba przeprowadzić bardzo wiele eksperymentów. I rzeczywiście, podczas znakomitej większości prób elektron znajduje się w miejscu, w którym, według teorii, prawdopodobieństwo jest duże, a bardzo rzadko znajduje się w miejscu o niskim prawdopodobieństwie. Obserwujemy jakościową zgodność wyniku z przewidywaniami. Natomiast szokujące jest to, że dwa, wydawałoby się, najzupełniej identyczne eksperymenty mogą dać całkiem różne rezultaty.

Równanie Schrödingera z interpretacją Borna do dziś odnosi ogromne sukcesy. Stanowi klucz do zrozumienia atomów wodoru, helu, a także - jeśli się ma dostatecznie potężny komputer - atomu uranu. Zastosowano je, by pojąć, w jaki sposób dwa pierwiastki łączą się, tworząc cząsteczkę związku chemicznego, przez co chemia zyskała znacznie mocniejsze podstawy naukowe. Dzięki temu równaniu skonstruowano mikroskop elektronowy, a nawet protonowy. W latach 1930-1950 wybrano się z nim do wnętrza jądra i tam okazało się równie przydatne, jak w atomie.

Równanie Schrödingera pozwala formułować przewidywania o dużym poziomie dokładności, ale przypomnijmy: są to przewidywania prawdopodobieństwa. Co to znaczy? Prawdopodobieństwo w fizyce przypomina prawdopodobieństwo w życiu. Na nim opiera się wielomiliardowy biznes, o czym mogą zapewnić menedżerowie agencji ubezpieczeniowych, zakładów odzieżowych czy niejednej firmy z listy pięciuset największych przedsiębiorstw. Agenci ubezpieczeniowi mogą ci powiedzieć, drogi Czytelniku, że przeciętny biały, niepalący, urodzony w 1941 roku Amerykanin będzie żył 76,4 lat. Ale nie określą, co się stanie z twoim bratem Salem urodzonym w tym samym roku. Wiedzą tylko, że jutro może go przejechać ciężarówka albo może umrzeć za dwa lata na skutek zakażenia paznokcia.

Podczas jednego z moich wykładów dla studentów Uniwersytetu w Chicago odgrywam rolę menedżera zakładów odzieżowych. Sukces w handlu fatalaszkami ma coś wspólnego z karierą w fizyce cząstek elementarnych. I tu, i tam potrzebna jest niezła znajomość prawdopodobieństwa i pojęcie o tweedowych marynarkach. Proszę wszystkich studentów o podanie swego wzrostu; dane nanoszę na diagram. Dwoje studentów ma 145 cm wzrostu, jeden 150, czworo - 160 itd. Jeden gość osiągnął 200 cm, znacznie więcej niż inni. Przeciętny wzrost wynosi 172 cm. Po wysłuchaniu 166 studentów otrzymuję elegancki zestaw schodków wspinających się do wysokości 172 cm i zstępujących w kierunku anomalii o wartości 200 cm. Mam zatem krzywą rozkładu wzrostu studentów pierwszego roku i jeśli jestem w miarę przekonany, że wybór fizyki nie wpływa w jakiś szczególny sposób na kształt tej krzywej, mogę przyjąć, że przedstawia ona rozkład wzrostu reprezentatywnej próbki wszystkich studentów uniwersytetu. Na osi pionowej mogę odczytać odsetek studentów o określonym wzroście. Mogę na przykład odczytać, jaki odsetek studentów należy do przedziału między 160 a 165 cm. Na podstawie mojego diagramu mogę też określić z prawdopodobieństwem równym 26 procent,

że wzrost następnego studenta, który przekroczy próg sali, wyniesie 170-175 cm, gdyby to akurat mnie interesowało.

Teraz mogę zaczynać szyć garnitury. Jeśli ci studenci mają stanowić moich odbiorców (mało prawdopodobne, gdybym to ja został krawcem), mogę ocenić, jaki procent garniturów powinien mieć rozmiar 36, 38 itd. Gdybym nie dysponował diagramem wzrostu, musiałbym zgadywać i mogłoby się zdarzyć, że pod koniec sezonu zostałbym ze stu trzydziestoma siedmioma nie sprzedanymi garniturami rozmiaru 46 (winą za to zawsze można obarczyć współnika, Jacka-pechowca).

Równanie Schrödingera rozwiązane dla dowolnej sytuacji dotyczącej procesów atomowych generuje krzywą analogiczną do krzywej rozkładu-wzrostu-studentów. Jednak jej kształt może być całkiem inny. Jeśli chcemy wiedzieć, gdzie się znajduje elektron w atomie wodoru - w jakiej odległości od jądra - otrzymamy rozkład gwałtownie zmniejszający się przy odległości 10^{-8} cm. Prawdopodobieństwo znalezienia elektronu we wnętrzu kuli o takim promieniu wyniesie 80 procent. Jest to wartość, jaką otrzymamy dla poziomu podstawowego. Jeśli pobudzimy elektron do następnego poziomu energetycznego, to otrzymamy krzywą dzwonową, wyznaczającą przeciętny promień czterokrotnie większy niż poprzedni. Możemy także obliczać krzywe prawdopodobieństwa innych procesów. Musimy tu dokonać wyraźnego rozróżnienia między pojęciem prawdopodobieństwa a możliwości. Możliwe stany energetyczne są dokładnie znane, ale jeśli zapytamy, na którym z nich znajduje się elektron, to odpowiedź możemy podać jedynie w postaci prawdopodobieństwa zależnego od historii układu. Jeśli elektron ma do wyboru więcej niż jedną możliwość przeskoczenia na niższą orbitę, to znowu możemy przewidywać prawdopodobieństwo, na przykład 82 procent, że skoczy na E_1 , 9 procent że skoczy na E_2 i tak dalej. Demokryt dobrze to wyraził, mówiąc: „Wszystko, co istnieje, jest dziełem przypadku i konieczności”. Różne stany energetyczne są koniecznościami, jedynymi możliwymi warunkami, ale tylko z pewnym prawdopodobieństwem możemy określać, że jakiś elektron znajdzie się na którymkolwiek z tych poziomów. To jest kwestią przypadku.

Pojęcia związane z prawdopodobieństwem są dziś dobrze znane ekspertom z agencji ubezpieczeniowych, ale wyraźnie wyprowadzały z równowagi fizyków działających na początku naszego stulecia (wielu ludzi nawet teraz nie za bardzo sobie z nimi radzi). Newton opisał deterministyczny świat. Jeśli rzucisz kamień, wystrzelisz raketę albo wprowadzisz planetę do Układu Słonecznego, możesz z całkowitą pewnością określić ich położenie, przynajmniej teoretycznie, o ile tylko znane były siły i warunki początkowe. Teoria kwantowa powiedziała: nie, warunki początkowe pozostają zawsze nie określone, i to jest ich cecha konstytutywna. Można jedynie obliczać prawdopodobieństwo i formułować prognozy na temat tego, co chce się akurat zmierzyć: położenie cząstki w przestrzeni, jej energię, prędkość czy cokolwiek innego. Podana przez Borna interpretacja równania Schrödingera niepokoiła fizyków, którzy w ciągu trzech wieków, jakie minęły od czasów Galileusza i Newtona, przyjęli determinizm jako niewzruszoną zasadę. Bali się, że w konsekwencji teorii kwantowej przekształcą się w wysokiej klasy speców od ubezpieczenia.

Niespodzianka na górskim szczycie

W roku 1927 angielski fizyk, Paul Dirac, próbował rozwinąć teorię kwantową, która w owym czasie nie chciała się zgadzać ze szczególną teorią względności Einsteina. Sommerfeld już wcześniej próbował przedstawić sobie nawzajem obie teorie. Dirac, pragnąc uczynić je szczęśliwym i zgodnym małżeństwem, nadzorował jego zawarcie i skonsumowanie. Przy okazji znalazł nowe eleganckie równanie (co ciekawe, nazywamy je teraz równaniem Diraca). To z tego potężnego równania wynika, że elektrony muszą mieć spin i wytwarzać pole magnetyczne. Przypomnij sobie, drogi Czytelniku, czynnik g z początku tego rozdziału. Obliczenia Diraca wskazywały na to, że moment magnetyczny elektronu, wyrażony czynnikiem g , wynosi 2,0. (Dopiero znacznie później udoskonalenie technik obliczeniowych pozwoliło otrzymać dokładną wartość, którą podałem wcześniej). Ale to jeszcze nie wszystko! Dirac (mając prawie 24 lata) stwierdził, że jego równanie opisujące falę elektronową miało dwa rozwiązania, z czego płynęły doprawdy dziwaczne konsekwencje: powinna istnieć inna cząstka o własnościach identycznych z elektronem, różniąca się od niego tylko ładunkiem elektrycznym. Stoi za tym bardzo proste matematyczne pojęcie: każde dziecko wie, że pierwiastek kwadratowy z 4 równy jest 2 oraz -2, bo $2 \times 2 = 4$ i $-2 \times -2 = 4$. Istnieją więc dwa rozwiązania: plus albo minus dwa.

Problem polegał na tym, że symetria wynikająca z równania Diraca oznaczała, iż dla każdej cząstki musi istnieć inna cząstka o takiej samej masie i przeciwnym ładunku elektrycznym. Dlatego Dirac, będąc konserwatywnym i tak przyziemnym dżentelmenem, że aż krążyły o tym legendy, przez jakiś czas zmagał się z tym dodatkowym rozwiązaniem, by wreszcie ustąpić i stwierdzić, iż w przyrodzie obok ujemnych muszą występować także dodatnie elektrony. Ktoś ukuł termin antymateria. Ta antymateria miała znajdować się wszędzie dookoła, tylko jakoś nikt nigdy jej jeszcze nie zauważył.

W roku 1932 młody fizyk z Caltech, Carl Anderson, zbudował komorę mgłową tak zaprojektowaną, by umożliwiała rejestrowanie i fotografowanie subatomowych cząstek. Magnes o dużej mocy otaczał urządzenie, by zakrzywiać tory cząstek pozwalając w ten sposób na badanie ich energii. Anderson złapał w swojej komorze jedną dziwną nową cząstkę, a raczej jej ślad. Nazwał ten nowy obiekt pozytonem, bo był identyczny z elektronem, tylko że zamiast ujemnego, miał dodatni ładunek. Publikacja Andersona nie nawiązywała do równania Diraca, ale wkrótce dostrzeżono łączący je związek. Anderson znalazł nową postać materii, antycząstkę, która parę lat wcześniej wyskoczyła z równania Diraca. Wspomniane ślady w komorze mgłowej były śladami promieniowania kosmicznego, cząstek przybywających z odległych zakątków naszej Galaktyki, stale bombardujących atmosferę. By otrzymać jeszcze dokładniejsze dane, Anderson przetransportował swą aparaturę z Pasadeny na szczyt górski w Kolorado, gdzie powietrze jest rozrzedzone, a promieniowanie kosmiczne bardziej intensywne.

Zamieszczone na pierwszej stronie „New York Timesa” zdjęcie Andersona, towarzyszące doniesieniom o odkryciu, było natchnieniem dla młodego Leona Ledermana, jego pierwszym spotkaniem z romantyczną przygodą - z taszczeniem aparatury na szczyt wysokiej góry w celu przeprowadzenia ważnego pomiaru. Okazało się, że antymateria ma duże znaczenie i że została nieodłącznie związana z życiem fizyków cząstek elementarnych. Obiecuję więcej o niej powiedzieć w dalszych częściach. Mamy zatem kolejny sukces teorii kwantowej.

Nieoznaczoność i inne rzeczy

W roku 1927 Heisenberg sformułował swą zasadę nieoznaczoności, wieńczącą tę wielką naukową rewolucję, którą zwiemy teorią kwantową. Prawdę mówiąc, rozwój teorii kwantowej trwał aż do lat czterdziestych. A właściwie - w wersji kwantowej teorii pola - ewoluuje ona do dziś i proces ten nie zostanie zakończony, dopóki nie dojdzie do całkowitego jej połączenia z grawitacją. Jednak dla naszych celów zasada nieoznaczoności stanowi odpowiednie zakończenie. Zasada ta, sformułowana przez Heisenberga, jest matematyczną konsekwencją równania Schrödingera. Mogłaby także być postulatem logicznym, czy też założeniem, nowej mechaniki kwantowej. Ponieważ bez zapoznania się z ideą Heisenberga nie zrozumiemy, jak nowy i inny jest świat kwantowy, powinniśmy się tu na chwilę zatrzymać.

Wszyscy fizycy kwantowi utrzymują, że liczą się tylko pomiary - drogie sercu eksperymentatora. Od teorii wymagamy jedynie, by przewidywała rezultaty mierzalnych zdarzeń. Zdanie to brzmi jak truizm, ale zapominanie o tym prowadzi do tak zwanych paradoksów, do których lubią się odwoływać pozbawieni wykształcenia popularyzatorzy. A muszę tu dodać, że to właśnie należąca do teorii kwantowej teoria pomiaru jest jej najbardziej kontrowersyjnym aspektem.

Heisenberg oznajmił, że nasza jednoczesna wiedza o położeniu cząstki i jej ruchu jest ograniczona i że połączona nieokreśloność tych dwóch wielkości musi być większa od... ni mniej, ni więcej, tylko właśnie od stałej Plancka h , którą po raz pierwszy spotkaliśmy we wzorze $E = h\nu$. Dokładności pomiaru położenia cząstki i jej ruchu (a ściślej jej pędu) są do siebie odwrotnie proporcjonalne. Im więcej wiemy o jednej wielkości, tym mniej wiemy o drugiej. Równanie Schrödingera podaje nam wartości prawdopodobieństwa dla tych wielkości. Jeśli nawet udałoby się nam obmyślić jakiś eksperyment, w wyniku którego dokładnie wyznaczymy położenie elektronu - powiedzmy, podając jakąś współrzędną z minimalnym błędem - to rozrzut możliwych wartości pędu będzie odpowiednio wielki, zgodnie z określonym przez Heisenberga związkami. Iloczyn dwóch nieoznaczoności (możemy przypisać im wielkości liczbowe) będzie zawsze większy od wszechobecnej stałej Plancka. Zasada Heisenberga raz na zawsze usuwa klasyczne pojęcie orbity. Nawet samo pojęcie położenia czy prędkości stało się nieco mniej wyraźne. Wróćmy teraz do Newtona i czegoś, co potrafimy sobie unaocznnić.

Przypuśćmy, że mamy prostą drogę, po której z przyzwoitą prędkością sunie toyota. Postanawiamy zmierzyć jej położenie w chwili, gdy przemyka obok nas. Chcemy też dowiedzieć się, jak szybko jedzie. W newtonowskiej fizyce określenie położenia i prędkości ciała w danym momencie pozwala dokładnie przewidzieć, gdzie ciało to znajdzie się w dowolnej chwili w przyszłości. Kiedy jednak będziemy gromadzili nasze linijki i stopery, flesze i aparaty fotograficzne, zauważamy, że im staranniej mierzymy położenie, tym bardziej maleje nasza zdolność do określenia prędkości i na odwrót. (Przypomnijmy, że prędkość jest miarą zmiany położenia podzielonej przez czas). Jednak w fizyce klasycznej możemy nieustannie doskonalić dokładność naszych pomiarów obu wielkości. Po prostu zwracamy się do jakiejś agencji rządowej z prośbą o większe fundusze i konstruujemy lepszą aparaturę.

Inaczej rzecz się przedstawia w świecie atomowym. Według postulatu Heisenberga mamy tam do czynienia z fundamentalną niepoznawalnością, której nie niweluje ani najlepsza aparatura, ani największa przemyślność, ani państwowe fundusze. Heisenberg zaproponował, aby uznać za fundamentalne prawo przyrody to, że iloczyn dwóch

nieoznaczoności jest zawsze większy niż h . Choć może się to wydawać dziwne, istnieją solidne podstawy fizyczne dla tego twierdzenia. Spróbujmy na przykład określić położenie elektronu. Najpierw musimy go „zobaczyć”. To znaczy trzeba odbić od niego światło - wiązkę fotonów. No dobrze. Już widzimy elektron. Znamy jego położenie w danym momencie. Ale foton odbijający się od elektronu wpływa na jego ruch. Jeden pomiar podważa drugi. W mechanice kwantowej pomiar w sposób nieunikniony wywołuje zmiany w mierzonym systemie, ponieważ mamy do czynienia z układami atomowymi, a narzędzia pomiaru, jakimi dysponujemy, nie mogą już być ani trochę mniejsze, delikatniejsze czy subtelnniejsze. Atomy mają jedną dziesięciomiliardową część centymetra średnicy i ważą milionową część miliardowej miliardowej części grama, tak że nie trzeba wiele, by znacząco wpłynąć na ich stan. Natomiast w wypadku układu klasycznego można mieć pewność, że akt pomiaru w sposób co najwyżej zanedbywalny wpływa na mierzony układ. Przypuśćmy, że chcemy zmierzyć temperaturę wody. Nie zmienimy temperatury jeziora, zanurzając w nim mały termometr. Ale włożenie wielkiego termometru do napastrka z wodą byłoby głupie, gdyż na pewno wpłynęłoby na temperaturę wody. Teoria kwantowa mówi, że musimy uwzględnić pomiar jako nieodłączną część układu atomowego.

Utrapienie z podwójną szczeliną

Najsłynniejszym i najbardziej pouczającym przykładem sprzecznej z intuicją natury teorii kwantowej jest eksperyment z podwójną szczeliną. Jako pierwszy przeprowadził go lekarz Thomas Young w 1802 roku. Rezultat został rozgłoszony jako niezbity dowód świadczący o falowym charakterze światła. Eksperymentator skierował wiązkę światła, powiedzmy żółtego, na przegrodę, w której wyciął dwie, bardzo blisko siebie położone, wąskie równoległe szczeliny. Na odległym ekranie widać było światło, które przedostało się przez szczeliny. Kiedy Young zasłonił jedną z nich, na ekranie widać było wyraźny, nieco rozszerzony wizerunek otwartej szczeliny. Gdy jednak zostały odsłonięte obie, rezultat okazał się dość nieoczekiwany. Drobiazgowe oględziny oświetlonego obszaru ekranu wykazały, że widać na nim serię równomiernie rozmieszczonych jasnych i ciemnych pasków. Ciemne paski to te obszary, do których światło w ogóle nie dotarło.

Paski te stanowią dowód na to, że światło jest falą - powiedział Young. Dlaczego? Są one wynikiem interferencji, która pojawia się wtedy, kiedy zderzają się ze sobą fale dowolnego rodzaju. Gdy dwie fale na wodzie zderzają się ze sobą grzbiet z grzbietem, wzmacniają się i powstaje mocniejsza fala; gdy grzbiet zderza się z doliną fali, znoszą się nawzajem i fala się rozplaszcza.

Podana przez Younga interpretacja eksperymentu z podwójną szczeliną głosiła, że zaburzenia falowe, które przybywają do ekranu ze szczelin, mają w pewnych miejscach fazy powodujące tłumienie. Grzbiet fali pochodzącej z jednej szczeliny spotyka się na ekranie z doliną fali biegnącej z drugiej szczeliny. Stąd wziął się ciemny pasek. Paski tego rodzaju stanowią niepodważalny dowód interferencji. Gdy na ekranie spotykają się dwa grzbiety lub dwie doliny, otrzymujemy jasny pasek. Eksperyment ten został powszechnie zaakceptowany jako dowód na to, że światło jest zjawiskiem falowym.

W zasadzie doświadczenie Younga można przeprowadzić w odniesieniu do elektronów i w pewnym sensie to właśnie zrobił Davisson w Laboratorium Bella. Eksperyment z elektronami także daje w efekcie obraz interferencyjny. Na ekranie umieszcza

się maleńkie liczniki Geigera, które trzeszczą, gdy padnie na nie elektron. Liczniki Geigera służą do wykrywania cząstek. By upewnić się, że działają należycie, zasłaniamy jedną ze szczelin grubą, ołowianą płytką, tak że nie przechodzą przez nią żadne elektrony. Teraz - jeśli poczekamy dostatecznie długo, aż parę tysięcy elektronów prześlizgnie się przez czynną szczelinę - okaże się, że każdy z liczników potrzaskuje co jakiś czas. Natomiast kiedy otwarte są obie szczeliny, pewne kolumny liczników ani pisną!

Chwileczkę! Zaraz, zaraz! Gdy jedna szczelina jest zamknięta, elektrony wychodzące z drugiej rozprzestrzeniają się. Jedne lecą prosto, inne w lewo, jeszcze inne w prawo, dając w efekcie z grubsza jednorodny rozkład trzasków pochodzących z liczników Geigera na całej powierzchni ekranu; podobnie jak u Younga żółte światło dawało szeroki jasny pasek. Innymi słowy, elektrony, zgodnie z oczekiwaniem, zachowują się jak cząstki. Natomiast z chwilą, kiedy usuniemy ołowianą przesłonę i pozwolimy elektronom przedostawać się także przez drugą szczelinę, obraz ulega zmianie i żadne elektrony nie docierają do pewnych kolumn liczników, co stanowi odpowiednik pojawiających się na oświetlonym ekranie ciemnych pasków. Teraz z kolei elektrony zachowują się jak fale. A przecież wiemy, że są cząstkami, bo liczniki trzeszczą.

Może, mógłby ktoś powiedzieć, dwa elektrony albo więcej przechodzą jednocześnie przez obie szczeliny i w ten sposób symulują falowy obraz interferencyjny. Żeby wykluczyć taką możliwość, zmniejszamy tempo emitowania elektronów do jednego na minutę. Ten sam obraz. Wniosek: elektron przechodzący przez pierwszą szczelinę wie, czy druga szczelina jest otwarta, czy zamknięta, bo w zależności od tego zmienia swe zachowanie.

Skąd nam się wzięły te „inteligentne elektrony”? Postaw się, drogi Czytelniku, w położeniu eksperymentatora. Masz wyrzutnię elektronów, a więc wiesz, że w kierunku ekranu wysyłasz cząstki. Wiesz też, że u celu także masz cząstki, bo trzeszczą liczniki Geigera - każdy trzask oznacza jedną cząstkę. Niezależnie więc od tego, czy otwarta jest jedna, czy dwie szczeliny, na początku i na końcu mamy do czynienia z cząstkami. Jednak miejsce, gdzie wyląduje dana cząstka, zależy od tego, ile szczelin pozostaje otwartych. A zatem wygląda na to, że cząstka przechodząca przez pierwszą szczelinę wie, czy druga jest otwarta, czy nie, ponieważ na podstawie tej wiedzy wydaje się wybierać swoją trasę. Jeśli druga szczelina jest zamknięta, cząstka mówi sobie: „W porządku, mogę wylądować w dowolnym punkcie ekranu”. Jeśli szczelina jest otwarta, mówi: „Oho, muszę unikać pewnych rejonów ekranu, aby powstał układ pasków”. Ponieważ jednak cząstki nie mogą „wiedzieć”, nasz dylemat „cząstka-czy-fala” doprowadził do kryzysu logicznego.

Mechanika kwantowa mówi, że możemy określić prawdopodobieństwo przejścia elektronu przez szczelinę i wylądowania na ekranie. Prawdopodobieństwo to jest falą, a fale interferują ze sobą tak jak w doświadczeniu z dwiema szczelinami. Gdy otwarte są obie szczeliny, fale prawdopodobieństwa ψ mogą ze sobą interferować i w pewnych obszarach ekranu dawać w efekcie zerowe prawdopodobieństwo ($\psi = 0$). Antropomorfizujące narzekania z poprzedniego akapitu są konsekwencją klasycznego stylu myślenia. W świecie kwantowym nie sposób za pomocą pomiaru odpowiedzieć na pytanie: skąd elektron wie, którą szczeliną ma przejść? Nie możemy zaobserwować całej trajektorii - toru ruchu - elektronu, dlatego pytanie: „Którą szczeliną przeszedł elektron?” nie jest pytaniem operacyjnym. Zasada nieoznaczoności Heisenberga zażegnuje także i ten impas, zwracając uwagę na to, że jeśli próbujemy badać trajektorię elektronu między

wyrzutnią a ekranem, zaburzamy jego ruch i niweczymy cały eksperyment. Możemy znać warunki początkowe (elektron wysłany ze źródła), możemy wiedzieć, jaki jest rezultat (elektron uderza w określone miejsce ekranu), ale - o ile nie chcemy zniweczyć całego eksperymentu - nie możemy poznać toru, jaki przebył elektron na drodze od źródła do ekranu.

Rozwiązanie proponowane przez mechanikę kwantową: „Nie martw się, tego nie da się zmierzyć”, jest logiczne, ale nie satysfakcjonuje większości ludzi, którzy pragną zrozumieć szczegóły otaczającego nas świata. Dla niektórych udręczonych dusz ta kwantowa niepoznawalność wciąż jest zbyt wysoką ceną. Mamy jednak ważny argument na jej obronę: jest to jedyna znana nam teoria, która działa.

Newton kontra Schrödinger

Trzeba kształtować w sobie nową intuicję. Przez całe lata uczymy studentów fizyki klasycznej, a potem nagle robimy zwrot i wykładamy teorię kwantową. Doktoranci potrzebują około dwóch lat na rozwinięcie takiej intuicji (ty, szczęśliwy Czytelniku, powinienes wykonać ten piruet w czasie czytania jednego rozdziału).

W tej sytuacji narzuca się pytanie: która z nich jest słuszna? Newton czy Schrödinger? Proszę o kopertę. Zwycięzcą jest... Schrödinger! Fizyka Newtona dotyczy dużych rzeczy, nie działa wewnątrz atomu. Natomiast teoria Schrödingera została stworzona do opisywania mikrozwisk, ale zastosowana do zjawisk makroskopowych daje wyniki identyczne z teorią Newtona.

Rozważmy klasyczny przykład. Ziemia krąży wokół Słońca. Elektron krąży - w starym języku Bohra - wokół jądra. Jednak na tor elektronu nałożone są pewne ograniczenia: może poruszać się tylko po określonych orbitach. Czy także w przypadku Ziemi okrążającej Słońce dozwolone są tylko pewne orbity? Newton powiedziałby, że nie; planeta może poruszać się po dowolnej orbicie. Ale poprawna odpowiedź brzmi: tak. Jeśli zastosujemy równanie Schrödingera do układu Słońce-Ziemia, rozwiązanie będzie się składało z dyskretnego zbioru orbit. Tylko byłoby ich bardzo wiele. W równaniu tym zamiast masy elektronu należałoby wstawić do mianownika masę Ziemi, tak więc tu, gdzie się znajdujemy - w odległości około 150 milionów kilometrów od Słońca - odległości między dozwolonymi orbitami byłyby bardzo niewielkie, powiedzmy jedna przypadająca na każdą miliardową miliardowej części centymetra, a więc w efekcie pokrywałyby całą przestrzeń. Zatem w praktyce otrzymalibyśmy rozwiązanie Newtona: wszystkie orbity są dozwolone. Jeśli wziąć równanie Schrödingera i zastosować je do makroobiektów, to na naszych oczach przekształca się w... $F = ma!$ W przybliżeniu. Na marginesie, to Rudjer Bošković w XVIII wieku wyraził przypuszczenie, że wzory Newtona są tylko wzorami przybliżonymi, dostatecznie dokładnymi dla procesów, które dotyczą wielkich odległości, ale nie przetrwają konfrontacji z mikroświatem. Dlatego nasi studenci nie muszą wyrzucać książek do mechaniki. Mogą dostać pracę w NASA albo w klubie sportowym, wyznaczać tor ruchu lądującego promu kosmicznego lub analizować trajektorie piłek, posługując się starymi, dobrymi równaniami Newtona.

Z punktu widzenia teorii kwantowej pojęcie orbity lub tego, co elektron robi wewnątrz atomu albo w wiązce, nie jest do niczego przydatne. Liczy się tylko rezultat pomiaru, a metody kwantowe mogą jedynie podać prawdopodobieństwo jakiegokolwiek

możliwego rezultatu. Pomiar położenia elektronu, powiedzmy w atomie wodoru, może dać liczbę - odległość od jądra. Liczbę tę otrzymuje się nie w wyniku obserwacji jednego elektronu, lecz podczas wielokrotnie powtarzanego pomiaru. Za każdym razem uzyskujemy inny rezultat, rysujemy krzywą reprezentującą wszystkie te wyniki i dopiero ten wykres możemy porównywać z przewidywaniami teorii. Teoria nie pozwala przewidzieć żadnego pojedynczego wyniku. Wszystko zależy od statystyki. Wracając do mojej odzieżowej analogii: nawet jeśli wiemy, że przeciętny wzrost studenta pierwszego roku Uniwersytetu w Chicago wynosi 172 cm, następny student może mieć 152 albo 180 cm. Nie potrafimy tego przewidzieć, możemy najwyżej wykreślić odpowiednią krzywą.

Dopiero przy próbach prognozowania rezultatów przejścia cząstek przez barierę albo rozpadu radioaktywnego robi się niesamowicie. Wielokrotnie przygotowujemy taki sam eksperyment. Wystrzelujemy elektron o energii 5 MeV w kierunku bariery o potencjale 5,5 MeV. Przewidujemy, że w 45 przypadkach na 100 elektron zdoła się przez nią przedrzeć. Ale nigdy, przenigdy nie możemy być pewni, co zrobi dany elektron. Jeden się przedostaje, inny - pod każdym względem identyczny - nie. Takie same eksperymenty dają różne rezultaty. Taki właśnie jest ten kwantowy świat. W naukach klasycznych podkreślamy znaczenie powtarzalności wyników. W świecie kwantowym możemy powtarzać wszystko oprócz rezultatów.

Ot, weźmy neutron, którego okres połowicznego rozpadu wynosi 10,3 minuty, co oznacza, że jeśli na początku mamy 1000 neutronów, to po upływie 10,3 minuty połowa z nich ulegnie dezintegracji. Ale konkretny neutron? Może się rozpaść po trzech sekundach albo po 29 minutach. Dokładny moment jego rozpadu jest nieprzewidywalny. Einstein nie znosił tej sytuacji, mówił: Bóg nie gra w kości z Wszechświatem. Inni krytycy stwierdzali: przypuśćmy, że w każdym neutronie lub elektronie tkwi jakiś mechanizm, jakaś sprężyna, jakaś „ukryta zmienna”, która sprawia, że każdy z nich jest inny, tak samo jak ludzie, którym można przypisać przeciętną długość życia. W odniesieniu do ludzi wiadomo, że działa wiele niezbyt-ukrytych-zmiennych - geny, zatkane naczynia wieńcowe itd. - które można by wykorzystać przy formułowaniu przewidywań dotyczących daty zgonu poszczególnych jednostek. Należałoby tylko wykluczyć skutki spadających wind, nieszczęśliwych miłości czy wymykających się spod kontroli mercedesów.

Hipoteza ukrytej zmiennej została w zasadzie wykluczona z dwóch powodów: żadna taka zmienna nie ujawniła się dotąd w ani jednym z milionów eksperymentów przeprowadzonych z udziałem elektronów. Ponadto nowe poprawione teorie dotyczące eksperymentów w mechanice kwantowej zupełnie wykluczyły możliwość jej istnienia.

Trzy rzeczy, które trzeba zapamiętać o mechanice kwantowej

Można powiedzieć, że mechanika kwantowa ma trzy godne podkreślenia własności: po pierwsze, jest sprzeczna z intuicją; po drugie, działa; po trzecie, pewne jej aspekty sprawiły, że Einstein, Schrödinger i im podobni nie potrafili jej zaakceptować, i z tego powodu wciąż jest przedmiotem wyężonych badań. Pomówmy więc teraz nieco obszerniej o każdym z tych punktów.

1. *Jest sprzeczna z intuicją.* Mechanika kwantowa zastępuje ciągłość dyskretnym rozkładem. By posłużyć się porównaniem: zamiast cieczy wlewanej do szklanki mamy teraz mialki piasek. Równomierny szum, który słyszysz, drogi Czytelniku, to uderzenia

wielkiej liczby atomów w twoje bębenki słuchowe. No i jeszcze ten omówiony już, niesamowity eksperyment z podwójną szczeliną.

Innym zjawiskiem całkowicie sprzecznym z intuicją jest tak zwany efekt tunelowy. Mówiliśmy o wysyłaniu elektronów w kierunku bariery. Analogiczną sytuacją w fizyce klasycznej jest toczenie kuli w górę po zboczu. Jeśli na początku pchnie się kulę dostatecznie mocno (dostarczy się jej dość energii), przetoczy się na drugą stronę. Jeśli energii będzie za mało, sturla się z powrotem. Albo wyobraźmy sobie wagonik kolejki w lunaparku uwięziony między dwoma przerażającymi wzniesieniami. Przypuśćmy, że wagonik wjechał do połowy wysokości jednego wzniesienia i stracił moc. Zsunie się w dół, a następnie wjedzie prawie do połowy drugiego wzniesienia i tak zacznie oscylować w tę i z powrotem, uwięziony na przełęczy. Gdybyśmy zdołali usunąć tarcie, wagonik oscylowałby bez końca między dwiema nieprzekraczalnymi zaporami. W kwantowej teorii atomowej podobny układ nazywa się stanem związanym. Jednak nasz opis tego, co dzieje się z elektronem skierowanym w stronę bariery energetycznej albo uwięzionym między dwiema barierami, musi uwzględniać fale prawdopodobieństwa. Okazuje się, że część fali może „przebiec” przez barierę (w układach atomowych albo jądrowych barierą jest oddziaływanie elektryczne albo silne). Dlatego też istnieje skończone prawdopodobieństwo, że uwięziona cząstka pojawi się poza pułapką. To było nie tylko niezgodne z intuicją, lecz także stanowiło paradoks, ponieważ podczas pokonywania bariery elektron musiałby mieć ujemną energię, co jest absurdem z klasycznego punktu widzenia. Ale dzięki rozwijającej się intuicji kwantowej można powiedzieć, że nie da się obserwować stanu elektronu „w tunelu”, dlatego nie jest to zagadnienie fizyczne. Można jedynie zaobserwować, że się wydostał. Zjawisko to - nazwane efektem tunelowym - znalazło zastosowanie przy wyjaśnianiu radioaktywnego rozpadu jąder; stanowi też podstawę działania ważnego urządzenia elektronicznego, zwanego diodą tunelową, która ma zastosowanie w dziedzinie fizyki ciała stałego. Bez tego niesamowitego efektu nie mielibyśmy nowoczesnych komputerów i innych urządzeń elektronicznych.

Punktowe cząstki, efekt tunelowy, radioaktywność, udręki z podwójną szczeliną - wszystko to przyczyniło się do powstania nowej intuicji potrzebnej fizykom kwantowym, którzy, uzbrojeni w nowy oręż intelektualny, wyruszyli na przełomie lat dwudziestych i trzydziestych na poszukiwanie nie wyjaśnionych zjawisk.

2. *Działa*. Zdarzenia w latach 1923-1927 pozwoliły zrozumieć naturę atomu, ale i tak w tej przedkomputerowej epoce potrafiąco właściwie poddać analizie tylko najprostsze atomy - wodoru, helu, litu - oraz te, z których usunięto część elektronów (atomy zjonizowane). Przełom nastąpił dzięki Wolfgangowi Pauliemu, jednemu z cudownych dzieci, który mając 19 lat zrozumiał teorię względności, a w wieku dojrzałym stał się *enfant terrible* fizyki.

W tym miejscu nie sposób uniknąć dygresji na temat Pauliego. Znany z wysokich standardów i krewkości, był sumieniem fizyki. A może po prostu człowiekiem prostolinijnym? Abraham Pais donosi, że niegdyś Pauli skarżył się mu, iż nie może znaleźć żadnego dostatecznie wyzywającego problemu, którym mógłby się zająć: „Może to dlatego, że wiem za dużo”. To nie przechwałka, tylko stwierdzenie oczywistego faktu. Można sobie wyobrazić, że Pauli był twardy dla swych asystentów. Gdy jeden z nich, Victor Weisskopf, przyszły czołowy teoretyk, zgłosił się kiedyś do Pauliego, ten zmierzył go od stóp do głów, potrząsnął głową i mruknął: „Ach, taki młody, a już nieznan”. Po paru miesiącach Weisskopf przyniósł mu swoją pracę teoretyczną. Pauli rzucił na nią okiem i rzekł: „No proszę, to nawet nie jest błędne”. Do jednego ze swych asystentów powie-

dział: „Nie przeszkadza mi, że myślisz powoli. Przeszkadza mi, że publikujesz szybciej, niż myślisz”. Nikt przy nim nie mógł się czuć bezpiecznie. Rekomendując kogoś na asystenta Einsteinowi, który w późniejszych latach życia zapuścił się w dosyć egzotyczne obszary matematyki w bezowocnym poszukiwaniu jednolitej teorii pola, Pauli napisał: „Drogi Panie Einstein, to jest dobry student, tylko nie pojmuję jasno różnicy między matematyką a fizyką. Z drugiej strony, Ty sam, drogi Mistrzu, już dawno straciłeś tę zdolność”. Kochany Wolfgang!

W 1924 roku Pauli sformułował fundamentalną zasadę, która pozwoliła wyjaśnić budowę układu okresowego pierwiastków. Problem: Atomy cięższych pierwiastków budujemy w ten sposób, że do jądra dokładamy dodatnie ładunki, a wokół niego rozmieszczamy elektrony na różnych dozwolonych poziomach energetycznych (w języku starej teorii kwantowej: na różnych orbitach). Gdzie mają iść elektrony? Pauli podał regułę, znaną dziś jako zakaz Pauliego, mówiącą, że żadne dwa elektrony nie mogą zajmować tego samego stanu kwantowego. Na początku było to jedynie intuicyjne założenie, ale z czasem zasada ta okazała się być konsekwencją głębokiej i uroczej symetrii.

Przyjrzyjmy się, jak św. Mikołaj w swym warsztacie produkuje pierwiastki chemiczne. Musi to zrobić porządnie, bo pracuje dla Bogini, a Ona jest twarda. Wodór jest łatwy: św. Mikołaj bierze jeden proton (jądro), dodaje elektron, który zajmuje najniższy możliwy stan energetyczny (w starej teorii Bohra, która wciąż jest użyteczna ze względu na jej obrazowość: orbitę o najmniejszym dozwolonym promieniu). Święty Mikołaj nie musi nawet uważać, po prostu upuszcza elektron gdziekolwiek w pobliżu jądra, a on sam „wskakuje” na najniższy stan podstawowy, emitując po drodze fotony. Teraz hel. W jądrze helu św. Mikołaj umieszcza dwa protony, musi więc dorzucić do niego dwa elektrony. Aby zrobić elektrycznie obojętny atom litu, potrzeba trzech elektronów. Problem w tym, że nie wiadomo, gdzie się mają one znaleźć. W kwantowym świecie dozwolone są tylko określone stany. Czy wszystkie elektrony tłoczą się w stanie podstawowym: trzy, cztery, pięć... elektronów? Tu właśnie wkracza zakaz Pauliego. Mówi on: nie, żadne dwa elektrony nie mogą zajmować tego samego stanu kwantowego. W atomie helu drugi elektron może dołączyć do pierwszego, znajdującego się na najniższym poziomie energetycznym, tylko wtedy, gdy ma przeciwny spin. Kiedy dokładamy w atomie litu trzeci elektron, nie może on już wejść na najniższy poziom energetyczny, musi się osiedlić na następnym, najniższym wolnym poziomie. Okazuje się, że ten stan ma znacznie większy promień (znów $r \propto 1/n^2$ teoria Bohra), co pozwala wyjaśnić aktywność chemiczną litu, a dokładnie - łatwość, z jaką ów pierwiastek może używać samotnego elektronu do tworzenia wiązań z innymi atomami. Po litie mamy beryl z czterema elektronami. W tym pierwiastku czwarty elektron dołącza do trzeciego, będącego na drugiej powłoce - bo tak właśnie nazywane są poziomy energetyczne.

Gdy tak sobie wesoło podążamy - beryl, bor, węgiel, azot, tlen, neon - dodajemy elektrony dopóty, dopóki nie wypełnimy każdej z powłok. W tej powłoce już dosyć - stwierdza Pauli. Zaczynamy nową. Mówiąc krótko, regularność własności chemicznych i zachowania pierwiastków bierze się z kwantowego wypełniania powłok *via* zakaz Pauliego. Parę dziesięcioleci wcześniej uczeni wyśmiewali Mendelejewa, który ustawiał pierwiastki w rzędach i kolumnach w zależności od ich własności. Pauli wykazał, że ta okresowość była ściśle związana z różnymi powłokami i stanami kwantowymi elektronów. Pierwszą powłokę wypełniają dwa elektrony, drugą - osiem, trzecią - też osiem i tak dalej. A zatem układ okresowy krył w sobie jakieś głębsze znaczenie.

Podsumujmy tę ważną koncepcję. Pauli wymyślił zasadę regulującą sposób, w jaki zmienia się rozmieszczenie elektronów w atomach pierwiastków chemicznych. Zasada ta wyjaśnia ich własności chemiczne (gaz szlachetny, aktywny metal itd.), wiążąc je z liczbą i stanem elektronów, zwłaszcza tych, które znajdują się na najwyższych powłokach i są najbardziej „narażone” na kontakt z innymi atomami. Zakaz Pauliego pociąga za sobą dramatyczne konsekwencje: gdy powłoka jest już zapełniona, nie można do niej dołożyć dodatkowych elektronów. Przeciwstawia się temu ogromna siła. To właśnie dlatego materia jest nieprzenikalna. Choć atomy składają się w ponad 99,99 procent z próżni, mam poważne problemy z przechodzeniem przez ścianę. Może Ty też, drogi Czytelniku? Dlaczego? W ciałach stałych atomy są zespolone dzięki skomplikowanym oddziaływaniom elektrycznym. Napór elektronów znajdujących się w Twoim ciele na elektrony składające się na ścianę jest bezskuteczny z powodu zakazu Pauliego, który nie dopuszcza, by elektrony znalazły się zbyt blisko siebie. Pocisk wystrzelony z pistoletu jest w stanie wniknąć w ścianę, ponieważ zrywa wiązania łączące atomy i jak lodolamacz przygotowuje miejsce dla swoich własnych elektronów. Zakaz Pauliego odgrywa także istotną rolę w tak dziwacznych i romantycznych obiektach, jakimi są gwiazdy neutronowe i czarne dziury. Ale znowu odszedłem od tematu.

Kiedy już rozumiemy zachowanie atomów, możemy rozwiązywać problem tworzenia się cząstek, na przykład wody (H_2O), chlorku sodu ($NaCl$), czyli soli kuchennej. Cząsteczki powstają dzięki złożonym oddziaływaniom między elektronami i jądrami łączących się atomów. Układ elektronów w powłokach stanowi klucz do utworzenia stabilnej cząsteczki. Teoria kwantowa dała więc chemii mocne podstawy naukowe. Chemia kwantowa jest dziś kwitnącą dziedziną, od której wzięło początek parę nowych dyscyplin, takich jak biologia molekularna, inżynieria genetyczna i medycyna molekularna. W materiałoznawstwie teoria kwantowa pomaga nam wyjaśniać i kontrolować własności metali, izolatorów, nadprzewodników i półprzewodników. Półprzewodniki doprowadziły do wynalezienia tranzystora, za co pełną zasługę odkrywcy przypisują kwantowej teorii metali, służącej im jako natchnienie do badań. Z tego odkrycia wzięły się komputery i mikroelektronika oraz rewolucja w komunikacji i przetwarzaniu informacji. No i są jeszcze lasery i masery - urządzenia całkowicie kwantowe.

Gdy pomiary sięgnęły do wnętrza jądra atomowego - rozmiary 100 tysięcy razy mniejsze od atomu - teoria kwantowa stała się niezbędnym narzędziem w tym nowym środowisku. Astrofizyka bada procesy gwiazdowe prowadzące do powstania tak egzotycznych ciał, jak Słońce, czerwone olbrzymy, białe karły, gwiazdy neutronowe i czarne dziury. Historię życia każdego z nich opisuje teoria kwantowa. Z punktu widzenia użyteczności społecznej, według naszych ocen, teoria kwantowa leży u źródła 25 procent dochodu narodowego brutto wszystkich państw uprzemysłowionych. Pomyśleć tylko: oto mamy tych wszystkich europejskich fizyków o władniętych żądzą poznania atomu, a z ich działań rodzi się działalność ekonomiczna o wartości wielu bilionów dolarów. Gdybyż tylko roztropne i przewidujące rządy pomyślały w stosownym czasie o nałożeniu podatku w wysokości jednej dziesiątej procentu od produktów, do których powstania przyczyniła się technologia kwantowa, i uzyskane pieniądze odłożyły na rozwój nauki i edukację... Cóż, w każdym razie teoria kwantowa naprawdę działa.

3. Są z nią pewne problemy. Chodzi o funkcję falową (ψ) i o to, co ona oznacza. Mimo że teoria kwantowa odniosła wielkie sukcesy praktyczne i teoretyczne, nie możemy być całkowicie pewni, co ona oznacza. Możliwe, że nasze zakłopotanie w obliczu teorii kwantowej jest skutkiem konstrukcji psychicznej ludzkiego umysłu, ale możliwe

także, że pojawi się jeszcze kiedyś jakiś geniusz, który opracuje schemat pojęciowy zadowalający wszystkich. Jeśli teoria kwantowa przyprawia cię, drogi Czytelniku, o mdłości, nie martw się: jesteś w doborowym towarzystwie. Wielu fizyków nie mogło się z nią pogodzić, między innymi Planck, Einstein, de Broglie i Schrödinger.

Istnieje bogata literatura na temat zastrzeżeń wobec probabilistycznej natury teorii kwantowej. Einstein przewodził walce i podjął długą serię usilnych prób (wcale nie łatwych do prześledzenia) podważenia zasady nieoznaczoności. Wciąż jednak ulegał Bohrowi, który stworzył to, co dziś zwiemy „kopenhaską interpretacją” mechaniki kwantowej. Bohr i Einstein naprawdę przyłożyli się do dyskusji. Einstein konstruował eksperymenty myślowe, które miały zadać cios w samo serce nowej teorii kwantowej, a Bohr, zazwyczaj po całym *weekendzie* ciężkiej pracy, wynajdywał błąd w jego rozumowaniu. W sporze tym Einstein odgrywał rolę kłopotliwego dzieciaka (jak ten, który na lekcjach religii pyta: Jeśli Bóg jest wszechmocny, to czy może stworzyć tak wielki kamień, że go sam nie może podnieść?) i wciąż wymyślał nowe paradoksy ukryte w teorii kwantowej. Bohr był księdzem, który wciąż obalał wysuwane przez Einsteina obiekcje.

Mówi się, że wiele ich dyskusji odbyło się podczas leśnych spacerów. Oczyma duszy widzę, co by się stało, gdyby kiedyś spotkali wielkiego niedźwiedzia. Bohr natychmiast wyciąga z plecaka parę butów do biegania (Reebok, 300 dolarów za parę) i szybko je sznukuje. „Co robisz, Niels? Przecież wiesz, że nie wyprzedzisz niedźwiedzia” - słusznie zwraca uwagę Einstein. „O nie, nie muszę wyprzedzać niedźwiedzia, drogi Albercie - odpowiada Bohr - wystarczy, bym wyprzedził Ciebie”.

W roku 1936 Einstein w końcu skapitulował i przyznał, że teoria kwantowa poprawnie opisuje wszystkie możliwe eksperymenty, w każdym razie te, które można sobie wyobrazić. Wtedy zmienił strategię i stwierdził, że mechanika kwantowa nie może być kompletnym opisem świata, nawet jeśli pozwala określić prawdopodobieństwo wyników rozmaitych pomiarów. Bohr odpowiedział, że niekompletność, która tak frasowała Einsteina, nie jest brakiem teorii, tylko własnością świata, w którym żyjemy. Ci dwaj rozprawiali nad mechaniką kwantową do grobowej deski i jestem przekonany, że wciąż ją roztrzásają, chyba że Starzec, jak Einstein zwykł był nazywać Boga, sam na skutek niewłaściwie pojmowanej troski rozstrzygnął za nich tę kwestię.

Wiele tomów można zapisać opowiadaniem o debatach Bohra i Einsteina. Ja spróbuję zilustrować problem jednym przykładem. Słowo przypomnienia o fundamentalnej zasadzie Heisenberga: żadne wysiłki zmierzające do jednoczesnego ustalenia, gdzie cząstka jest i dokąd się udaje, nie mogą nigdy zostać uwiecznione całkowitym sukcesem. Zaplanuj eksperyment, aby określić położenie cząstki, i oto jest, z dokładnością, jakiej tylko zapragniesz. Zaplanuj pomiar, by zobaczyć, jak szybko się porusza - *presto*, otrzymujemy prędkość. Ale nie możemy mieć obu rzeczy naraz. Rzeczywistość odślaniana przez te pomiary zależy od strategii przyjętej przez eksperymentatora. Ten subiektywizm rzuca wyzwanie tak bliskiej naszemu sercu wierze w przyczynę i skutek. Jeśli elektron startuje z punktu A i zaobserwowano go potem w punkcie B, to wydaje się „naturalne” przyjęcie, że przybył tam, pokonując jakiś konkretny tor łączący A z B. Teoria kwantowa temu przeczy, mówiąc, że droga jest niepoznawalna. Wszystkie drogi są możliwe, każda z pewnym prawdopodobieństwem.

By zdemaskować niekompletność tej koncepcji toru-widma, Einstein zaproponował pewien eksperyment. Nie przedstawię w pełni rozumowania Einsteina, postaram się tylko je naszkicować. Jest ono znane jako eksperyment myślowy EPR - od nazwisk trzech jego twórców: Einstein, Podolsky i Rosen. Miało to być doświadczenie z udziałem

łem dwóch cząstek, których losy są ze sobą ściśle związane. Znamy metody tworzenia par cząstek w ten sposób, że muszą mieć przeciwne spiny: jeśli jedna z nich wiruje w dół, to druga musi wirować w górę, albo jedna w lewo, a druga w prawo. Wysyłamy jedną cząstkę do Chicago, a drugą do Bangkoku. Einstein powiedział: w porządku, zaakceptujemy fakt, że nie wiemy nic o cząstce aż do chwili pomiaru. Mierzmy więc cząstkę A w Chicago i stwierdzamy, że ma spin skierowany w prawo. *Ergo*, wiemy teraz coś o cząstce B, znajdującej się w Bangkoku, której jeszcze nawet nie poddano obserwacjom. Na początku cząstka mogła z prawdopodobieństwem równym 0,5 mieć spin skierowany zarówno w prawo, jak i w lewo. Teraz, po pomiarze dokonanym w Chicago, wiemy, że cząstka ta wiruje w lewo. Ale skąd ona wie, jaki był rezultat tamtego pomiaru? Nawet jeśli miałyby przy sobie małe radio, to przecież fale radiowe podróżują z prędkością światła i potrzebują trochę czasu na przebycie od cząstki A do cząstki B. Co to za system komunikowania się, który nie ma nawet dość przyzwoitości, by nie poruszać się szybciej od światła? Einstein nazwał to zjawisko „dziwacznym oddziaływaniem na odległość”. Eksperyment EPR podsumowano wnioskiem, że związek między zdarzeniami dotyczącymi cząstki A (decyzja wykonania pomiaru A) a rezultatem pomiaru B można zrozumieć tylko pod warunkiem, że dysponuje się dodatkowymi danymi, a teoria kwantowa nie może ich dostarczyć. Aha! - zawołał Albert. - Mechanika kwantowa jest niekompletna!

Kiedy Einstein przyłożył Bohrowi tym eksperymentem, ruch uliczny w Kopenhadze zamarł, a Bohr zagłębił się w rozważaniach. Einstein próbował podejść z boku zasadę nieoznaczoności Heisenberga, dokonując pomiaru towarzyszącej cząstki. Bohr w końcu odpowiedział, że nie można separować zdarzeń dotyczących A i B, że układ musi obejmować zarówno A, jak i B oraz obserwatora, który decyduje, kiedy dokonywać pomiarów. Wielu uznało, że ta holistyczna odpowiedź zawiera w sobie elementy mistycyzmu religii Wschodu i wiele (zbyt wiele) książek napisano o związkach łączących teorię kwantową z filozofiami Wschodu. Sedno problemu tkwi w tym, czy cząstka A i obserwator (albo detektor tej cząstki) istnieje rzeczywiście, czy też przed pomiarem są tylko nic nie znaczącymi, tymczasowymi duchami. To konkretne zagadnienie zostało rozwiązane dzięki przełomowi teoretycznemu i (aha!) genialnemu eksperymentowi.

Dzięki twierdzeniu udowodnionemu w roku 1964 przez teoretyka o nazwisku John Bell stało się jasne, że możliwe jest przeprowadzenie w laboratorium zmodyfikowanej wersji eksperymentu EPR. Bell podał ideę eksperymentu, w którym w zależności od tego, czy rację miał Einstein, czy Bohr, można otrzymać różne wielkości związku na odległość łączącego cząstki A i B. Twierdzenie Bella otaczane jest niemalże religijną czcią w pewnych kręgach, częściowo dlatego, że dobrze mieści się na podkoszulku. Wiem na przykład o istnieniu co najmniej jednego klubu dla pań, bodajże w Springfield, którego członkinie spotykają się w czwartkowe popołudnia, by omawiać twierdzenie Bella. Ku zgorszeniu samego Bella, jego twierdzenie zostało rozgłoszone przez niektórych jako „dowód” na istnienie zjawisk paranormalnych i metapsychicznych.

Idea Bella zaowocowała serią eksperymentów. Szczególnym sukcesem zakończyło się doświadczenie przeprowadzone przez Alaina Aspecta i jego współpracowników w roku 1982 w Paryżu. Eksperyment ten sprowadzał się do pomiaru korelacji między wynikami A i B. Innymi słowy, polegał na sprawdzeniu, ile razy w obu pomiarach otrzymano jednakowe wyniki: lewy spin i lewy spin albo prawy i prawy. Analizy Bella pozwalają na przewidzenie wielkości tej korelacji przy założeniu, że słuszna jest albo interpretacja Bohra o tak-kompletnej-jak-tylko-to-możliwe” teorii kwantowej, albo przeświadcze-

nie Einsteina, że musi istnieć jakaś ukryta zmienna, która determinuje tę korelację. Eksperyment wykazał, że ujęcie Bohra było słuszne, a Einsteina błędne. Najwyraźniej te długozasięgowe korelacje występujące między cząstkami są po prostu częścią przyrody.

Czy w ten sposób zakończyliśmy wreszcie dyskusję? W żadnym wypadku. Ona wciąż szaleje! Jednym z bardziej intrygujących miejsc, w których kwantowa niesamowitość ujawnia się w całej krasie, jest sam moment stworzenia Wszechświata. W najwcześniejszej fazie jego narodzin Wszechświat miał subatomowe rozmiary i mechanika kwantowa odnosiła się do niego całego. Być może wyrażę pogląd całej rzeszy fizyków, mówiąc, że będę się trzymał badań prowadzonych za pomocą akceleratora, ale ogromnie się cieszę, że ktoś wciąż jeszcze martwi się o pojęciowe podstawy teorii kwantowej.

Jeśli zaś chodzi o pozostałych - jesteśmy dobrze uzbrojeni w równania Schrödingera, Diraca i nowszej kwantowej teorii pola. Drogę do Boskiej Cząstki - a przynajmniej jej początek - widać już bardzo wyraźnie.

8. Interludium B: Tańczący mistrzowie wiedzy tajemnej

Chcę wiedzieć, jak Bóg stworzył ten świat.

Nie interesuje mnie to czy inne zjawisko. Chcę znać Jego myśli, reszta to szczegóły.

ALBERT EINSTEIN

Podczas nie kończącego się procesu wzniecania i podtrzymywania wśród szerokich kręgów społeczeństwa entuzjazmu dla budowy nadprzewodzącego superakceleratora (SSC) odwiedziłem w Waszyngtonie senatora Bennetta Johnstona, demokratę z Luizjany. Jego poparcie było ogromnie ważne dla losów mającego kosztować osiem miliardów dolarów akceleratora. Johnston jest dość dociekliwym człowiekiem jak na senatora Stanów Zjednoczonych. Lubi rozmawiać o czarnych dziurach, pętłach czasowych i tym podobnych zjawiskach. Gdy wszedłem do jego gabinetu, wstał zza biurka i potrząsnął mi przed nosem książką. „Panie Lederman, mam do pana mnóstwo pytań na ten temat” - powiedział. Była to książka *Tańczący Mistrzowie Wu Li* Gary'ego Zukava. Wdał się w rozmowę o fizyce i spędziłem z nim ponad godzinę zamiast zaplanowanego kwadransa. Wciąż czekałem na jakąś zręczną okazję, czy choćby tylko pauzę, którą mógłbym wykorzystać jako punkt wyjścia dla wtrącenia swojej śpiewki w sprawie SSC („Skoro już mowa o protonach, to wie pan, mam na oku taką maszynę...”). Ale Johnston był niezmiernie wytrwały, bez przerwy mówił o fizyce. Gdy sekretarka przerwała nam po raz czwarty, uśmiechnął się i powiedział: „Wiem, po co pan przyszedł. Gdyby mnie pan zaczął namawiać, obiecałbym, że zrobię, co w mojej mocy, ale tak było znacznie ciekawiej! Oczywiście, zrobię, co w mojej mocy”. I naprawdę zrobił całkiem sporo.

Trochę mnie zaniepokoiło to, że żądny wiedzy senator zaspokajał ciekawość, czytając książkę Zukava. W ciągu ostatnich kilku lat ukazało się mnóstwo publikacji - *Tao fizyki* Fritjofa Capry może być kolejnym przykładem - które usiłują wyjaśniać współczesną fizykę w kategoriach pojęciowych właściwych wschodnim religiom i mistycyzmowi. Ich autorzy mają skłonność do formułowania ekstatycznych konkluzji typu: wszyscy jesteśmy częścią kosmosu, kosmos jest częścią nas. Wszyscy jesteśmy jednością! (A bank, nie wiadomo dlaczego, przysyła rachunki każdemu z osobna). Niepokojące jest to, że senator mógł nabić sobie głowę dziwnymi pomysłami, pochodzącymi z takich książek, tuż przed ważnym głosowaniem nad losami urzędnika wartego ponad osiem miliardów dolarów, którym mają zarządzać fizycy. Oczywiście, Johnston zna się trochę na nauce i zna wielu naukowców.

Natchnieniem dla tych książek jest zazwyczaj teoria kwantowa i jej wrodzona niesamowitość. Jedna z nich - niech na zawsze pozostanie bezimienna - przedstawia trzeźwe rozważania na temat zasady nieoznaczoności Heisenberga, eksperymentu myślowego EPR i twierdzenia Bella, a następnie przechodzi do entuzjastycznej dyskusji nad doznaniem psychicznymi wywołanymi przez LSD, opowiada o duchach i zmarłej dawno temu istocie o imieniu Seth, która przekazywała swoje idee za pośrednictwem pewnej gospodyni domowej zamieszkałej w Elmira, w stanie Nowy Jork. Najwyraźniej przesłanką tego dzieła i innych jemu podobnych jest przekonanie, że skoro teoria kwantowa jest niesamowita, to czemuż by nie podnieść do rangi faktów naukowych także i innych dziwnych rzeczy?

Nie warto byłoby zwracać sobie głowy takimi książkami, gdyby w księgarniach leżały one w działach poświęconych zjawiskom paranormalnym czy ezoterycznym. Nie-

stety, często bywają umieszczane w dziale wydawnictw naukowych, być może dlatego, że ich tytuły zawierają słowo „kwant” lub „nauka”. Zbyt wiele z tego, co czytelnicy wiedzą na temat fizyki, czerpią właśnie z książek tego typu. Przyczepię się tutaj do dwóch z nich, najbardziej wybitnych w swojej kategorii: *Tao fizyki* i *Tańczący Mistrzowie Wu Li*. Obie zostały opublikowane w latach siedemdziesiątych. Trzeba przyznać, że te książki - *Tao* Fritjofa Capry, który otrzymał doktorat na Uniwersytecie Wiedeńskim i *Mistrzowie* Gary'ego Zukava - pozwoliły wielu ludziom zapoznać się z fizyką. To bardzo dobrze. I z pewnością nie ma nic złego w doszukiwaniu się paralel między nową fizyką kwantową a hinduizmem, buddyzmem, taoizmem, filozofią Zen, czy choćby tradycyjną kuchnią kantońską. Ponadto Capra i Zukav wiele zagadnień przedstawili poprawnie. Każda z tych książek jest miejscami całkiem niezłe napisana i dobrze popularyzuje zagadnienia fizyczne, przez co wydaje się wiarygodna. Niestety, autorzy przeskakują od pewnych udowodnionych pojęć naukowych do takich, które leżą daleko poza granicami fizyki, a logiczny pomost łączący jedno z drugim, jeśli w ogóle istnieje, jest nadzwyczaj chwiejny.

Na przykład Zukav całkiem niezłe uporał się z wyjaśnieniem słynnego eksperymentu Younga z podwójną szczeliną. Ale podana przez niego analiza wyników jest zadziwiająca. Jak już mówiliśmy, w zależności od tego, czy jedna, czy dwie szczeliny są otwarte, otrzymuje się różny rozkład fotonów (albo elektronów). Eksperymentator mógłby zatem zadać sobie pytanie: skąd cząstka „wie”, ile szczelin jest otwartych? Jest to, oczywiście, dość cudaczny sposób pytania o mechanizm zjawiska. Zasada nieoznaczoności Heisenberga, pojęcie leżące u podstaw teorii kwantowej, mówi, że nie można określić, którą szczeliną przechodzi cząstka, nie niwecząc całego eksperymentu. Za sprawą może dziwacznym, ale efektywnym rygorów nałożonych przez teorię kwantową, pytania tego rodzaju są zupełnie pozbawione sensu.

Ale Zukav dowiedział się z tego eksperymentu czegoś zupełnie innego: cząstka wie, czy otwarta jest jedna szczelina, czy dwie. Fotony są inteligentne! Ale to jeszcze nie wszystko: „Jesteśmy zmuszeni przyznać - pisze Zukav - że fotony, będące energią, przypuszczalnie przetwarzają informację i dostosowują swoje zachowanie do wymogów sytuacji, a także, choć może to zabrzmieć dziwnie, wydają się tworam organicznymi”. To są zabawne rozważania, może nawet filozoficzne, ale dawno już opuściliśmy obszar nauki.

Paradoksalnie, choć Zukav gotów jest przypisać świadomość fotonom, nie akceptuje istnienia atomów. Pisze: „Atomy nigdy nie były czymś »rzeczywistym«. Są hipotetycznymi bytami skonstruowanymi po to, by dane eksperymentalne uczynić bardziej zrozumiałymi. Nikt, ale to nikt żadnego z nich nigdy nie widział”. Znowu odzywa się pani z audytorium, rzucająca nam wyzwanie: „Czy widział pan kiedy atom?” Ona przynajmniej zadawała pytanie i gotowa była wysłuchać odpowiedzi. Zukav sam udzielił odpowiedzi - negatywnej. Ale jeśli nawet zechcemy dziś dosłownie interpretować jego poglądy, okaże się, że znacznie rozmiągają się z prawdą. Od czasu opublikowania *Mistrzów* wielu ludzi widziało atomy dzięki skanującemu mikroskopowi, który pozwala robić malcom piękne zdjęcia.

Capra jest znacznie bystrzejszy i ostrożniej formułuje swoje tezy, choć w zasadzie też pozostaje niedowiarkiem. Twierdzi, że należy porzucić „prosty mechanistyczny obraz odwołujący się do podstawowych cegiełek”. Wychodząc od rozsądnych rozważań o fizyce kwantowej, konstruuje zawile spekulacje i wykazuje zupełny brak zrozumienia dla

misternej sieci powiązań, łączących teorię z eksperymentem, oraz tego, jak wiele potu, trudu i łez kosztuje każdy krok na drodze rozwoju nauki.

O ile lekceważący stosunek do nauki prezentowany przez omawianych autorów tylko zniechęca mnie do nich, o tyle prawdziwi szarlatani po prostu mnie denerwują. Prawdę mówiąc, *Tao* i *Mistrzowie* to stosunkowo przyzwoici przedstawiciele pisarstwa należącego do pośredniej strefy między dobrymi książkami naukowymi a obłąkaną twórczością szarlatanów, oszustów i szaleńców. Ci ludzie gwarantują życie wieczne tym, którzy ograniczą swą dietę do korzeni sumaku. Donoszą o spotkaniach z istotami pozaziemskimi. Demaskują fałsz teorii względności, ponad którą przedkładają sumeryjski odpowiednik *Kalendarza dla rolników*. Pisują do brukowej prasy i zarzucają stertami listów wszystkim znanych naukowców. Większość z tych ludzi jest nieszkodliwa, jak ta siedemdziesięcioletnia kobieta, która na ośmiu gęsto zapisanych stronicach donosiła mi o swojej konwersacji z małymi zielonymi gośćmi z kosmosu. Ale nie wszyscy są nieszkodliwi. Sekretarz redakcji czasopisma „Physical Review” został zastrzelony przez człowieka, któremu odmówiono publikacji niespójnego artykułu.

Trzeba przyznać, że we wszystkich dziedzinach, wszystkich obszarach ludzkiej działalności istnieje taka czy inna forma *establishmentu*, czy to w postaci grupy starzejących się profesorów fizyki z prestiżowych uniwersytetów, potentatów restauracji typu *fast food* lub wyższych oficjeli organizacji skupiającej prawników. Postęp w nauce wtedy przebiega najszybciej, gdy obala się gigantów. Dlatego nawet sami członkowie *establishmentu* gorliwie poszukują obrazoburców, buntowników z (intelektualnymi) bombami. Oczywiście, nikt się nie cieszy, widząc własną teorię obróconą w perzynę. Niektórzy mogą nawet zareagować - odruchowo i tylko przez moment - jak polityczny *establishment* w obliczu rebelii. Ale tradycja przewrotów zbyt silnie wrosła w strukturę nauki. Kształcenie i nagradzanie młodych i twórczych adeptów jest świętym obowiązkiem uczonego. (Najsmutniejsza ocena, jaką można komuś wystawić, brzmi: sama młodość to jeszcze nie wszystko). Ta etyka, nakazująca otwartość wobec młodzieży, wywrotowców i przeciwników ortodoksji, stwarza sposobność, by wślizgnęli się także szarlatani i pomyłeńcy. Mogą oni żerować na niedouczonej, nierozważnych dziennikarzach, redaktorach i innych strażnikach mediów. Niektórzy oszuści zdołali odnieść godny podziwu sukces, oł, choćby izraelski magik Uri Geller albo pisarz Immanuel Velikowsky, czy nawet niektórzy posiadacze doktoratów w dziedzinie nauk ścisłych. (Tytuł doktora w jeszcze mniejszym stopniu jest rękojmnią prawdy niż Nagroda Nobla). To właśnie ludzie tego pokroju stanowią źródło doniesień o takich cudach jak „widzące dłonie”, „psychokineza”, „kreacjonizm”, „poliwoda”, „zimna fuzja” i wiele innych oszukańczych pomysłów. Zazwyczaj twierdzą oni, że skostniały *establishment* prześladowuje nowo odkrytą prawdę, pragnąc dla siebie zachować prawa i przywileje.

Oczywiście, może się tak zdarzyć. Ale w naszej dziedzinie nawet członkowie *establishmentu* buntują się przeciw *establishmentowi*. Nasz święty patron, Richard Feynman, w eseju zatytułowanym „Czym jest nauka” napominał studentów: „uczcie się od nauki, że nie wolno wam wierzyć ekspertom. [...] Nauka to wiara w ignorancję ekspertów”. A dalej: „Każde pokolenie, które odkrywa coś nowego, musi przekazać to następnym, ale musi to przekazać w postaci delikatnie zrównoważonej mieszanki poszanowania i jego braku, tak, aby nasza rasa [...] nie przekazywała młodym swoich błędów, lecz skumulowaną mądrość oraz tę mądrość, że może ona wcale nie być mądrością”.

Ten wymowny fragment wyraża głębokie przekonanie nas wszystkich, którzy trudziliśmy się w winnicy nauki. Oczywiście, nie wszyscy uczeni potrafią posługiwać się kry-

tycznym zmysłem, zebrać w sobie mieszaninę pasji i zrozumienia, o której pisał Feynman. To jest jedna z wielu rzeczy, którymi naukowcy różnią się między sobą. Prawdą jest też, że niektórzy traktują siebie zbyt poważnie; nie potrafią wówczas ocenić krytycznie własnej pracy albo, co gorsza, pracy młodych ludzi, którzy rzucają im wyzwania. Żadna dziedzina nie jest doskonała, ale społeczeństwo nie zdaje sobie sprawy, jak chętnie, z jakim zapałem i radością społeczność naukowa danej dziedziny wiedzy wita intelektualnych obrazoburców - jeśli tylko mają oni cokolwiek do zaoferowania.

Tragedia tkwi nie w tym, co piszą kiepscy pseudonaukowi pisarze, nie w tym, że agent ubezpieczeniowy z Wichita wie dokładnie, w którym miejscu Einstein popełnił błąd, i pisze o tym książkę, nie w tym, że jakiś oszust powie wszystko jedno co, byle tylko zarobić parę groszy, nie w tym, co robią Geller, Velikovsky i im podobni. Tragedią są szkody, jakie ponosi łatwowiejne i niedouczone społeczeństwo, które tak łatwo jest omamić. Ludzie będą kupować piramidki, zapłacą krocie za zastrzyki z wyciągu z małpich gruczołów, będą żuć pestki moreli, pójdą wszędzie i zrobią wszystko, czego od nich zażądają różni hochsztaplerzy, którzy - awansowawszy z jarmarcznych kramów do najpopularniejszych programów telewizyjnych - w imię nauki sprzedają coraz więcej zuchwałych paliatywów.

Dlaczego jesteśmy - mówiąc „my”, mam na myśli społeczeństwo - tak bardzo podatni na podobną manipulację? Być może czujemy się niepewnie w obliczu nauki, bo nie jesteśmy zaznajomieni z mechanizmami jej ewolucji i rozwoju. Społeczeństwo postrzega naukę jako monolityczny gmach, wzniesiony przy użyciu niewzruszonych reguł i przekonań, a także - dzięki stworzonemu przez media wizerunkowi drętowego jajogłowego - traktuje naukowców jako starych, sklerotycznych obrońców *status quo*. W rzeczywistości nauka jest znacznie bardziej elastyczna. Istotą nauki nie jest *status quo*, lecz rewolucja.

Pomruki rewolucji

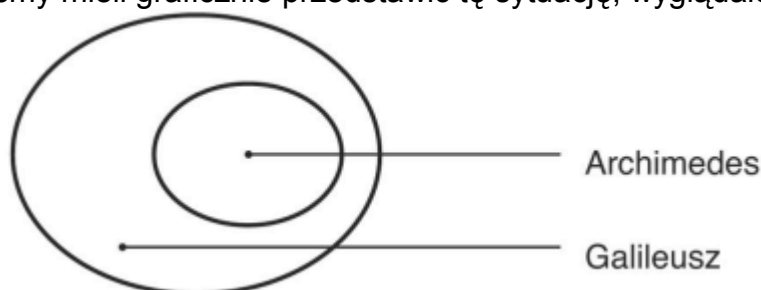
Teoria kwantowa stanowi łatwy cel dla pisarzy, którzy chcą porównać ją do jakichś systemów religijnych czy mistycznych. Klasyczna fizyka newtonowska często przedstawiana była jako bezpieczna, logiczna i zgodna z intuicją. Potem „zastępuje” ją teoria kwantowa, sprzeczna z intuicją i dziwaczna. Jest niezrozumiała i wzbudza obawy. Jeden ze sposobów radzenia sobie z nią - sposób stosowany w niektórych ze wspomnianych książek - polega na traktowaniu teorii kwantowej jak religii. Dlaczego nie uznać jej za jakąś formę hinduizmu (albo buddyzmu itd.)? Dzięki temu logikę można pozostawić całkiem na boku.

Inny sposób odwołuje się do teorii kwantowej jako... no cóż, jako nauki. Chodzi o to, by nie dać się omamić propagandzie o zastępowaniu tego, co było przedtem. W nauce nie ma takiego zwyczaju, by ni stąd, ni zowąd wyrzucać wielowiekowe, zasłużone idee; zwłaszcza te, które wciąż jeszcze zupełnie dobrze funkcjonują. Warto w tym miejscu zrobić małą dygresję, by zobaczyć, jak przebiegały rewolucje w fizyce.

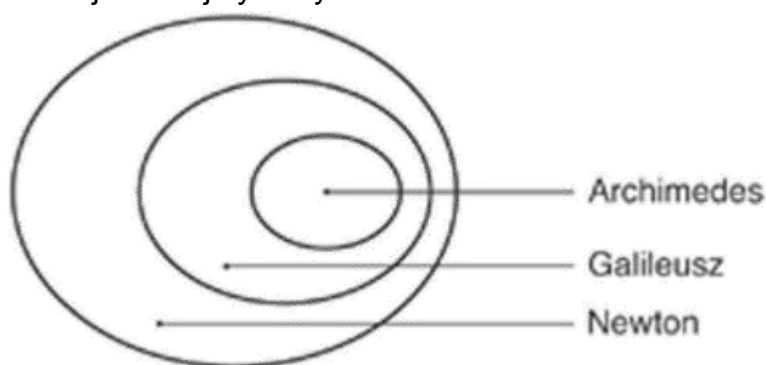
Nowa fizyka nie zawsze obala starą. Rewolucje w nauce przebiegają konserwatywnie i oszczędnie. Mogą z nich płynąć oszałamiające konsekwencje filozoficzne, mogą one sprawiać wrażenie, że wykraczają poza potoczne doświadczenie, ale tak naprawdę dzieje się tylko to, że stary dogmat zostaje rozciągnięty na nową dziedzinę.

Weźmy starego Greka, Archimedesesa. W setnym roku przed naszą erą sformułował zasady statyki i hydrostatyki. Statyka zajmuje się badaniem warunków stabilności struktur, takich jak drabiny, mosty i sklepienia. Zazwyczaj chodzi tu o obiekty, które człowiek zaprojektował, by uczynić swe życie bardziej wygodnym. Prace Archimedesesa nad hydrostatyką dotyczyły cieczy i tego, co w nich pływa, a co tonie; co pływa stabilnie, a co się chwieje i obraca; dotyczyły zasad wyporu hydrostatycznego oraz problemu, dlaczego w wannie krzyczy się „Heureka!” i tym podobnych. Te zagadnienia oraz dotyczące ich odkrycia Archimedesesa są dziś tak samo ważne jak dwa tysiące lat temu.

W roku 1600 Galileusz badał prawa statyki i hydrostatyki, ale rozszerzył zakres swych zainteresowań na ciała będące w ruchu: obiekty toczące się w dół po równiach pochyłych, kulki zrzucane z wysokich wież, obciążone struny od lutni wahające się w warsztacie ojca. Prace Galileusza obejmowały swym zakresem prace Archimedesesa, ale znacznie więcej wyjaśniały. W rzeczywistości, pozwoliły zająć się szczegółami powierzchni Księżyca i satelitami Jowisza. Galileusz nie obalił Archimedesesa, lecz go wchłonał. Gdybyśmy mieli graficznie przedstawić tę sytuację, wyglądałoby to tak:

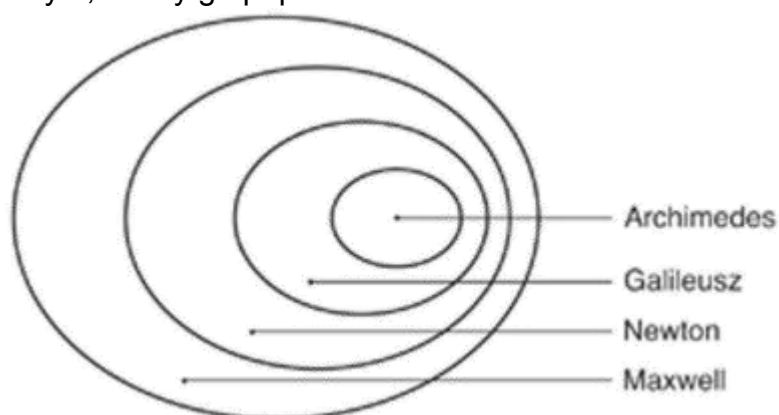


Newton wykroczył daleko poza Galileusza. Wprowadził rozważania na temat przyczyn i dzięki temu mógł wyjaśnić budowę Układu Słonecznego i morskie pływy. Syntezy Newtona zawierały nowe pomiary ruchów planet i ich księżyców. Żaden szczegół newtonowskiej rewolucji nie rzucił nawet cienia wątpliwości na osiągnięcia Galileusza czy Archimedesesa. Natomiast pozwoliła ona znacznie rozszerzyć obszary Wszechświata, będące przedmiotem tej wielkiej syntezy.

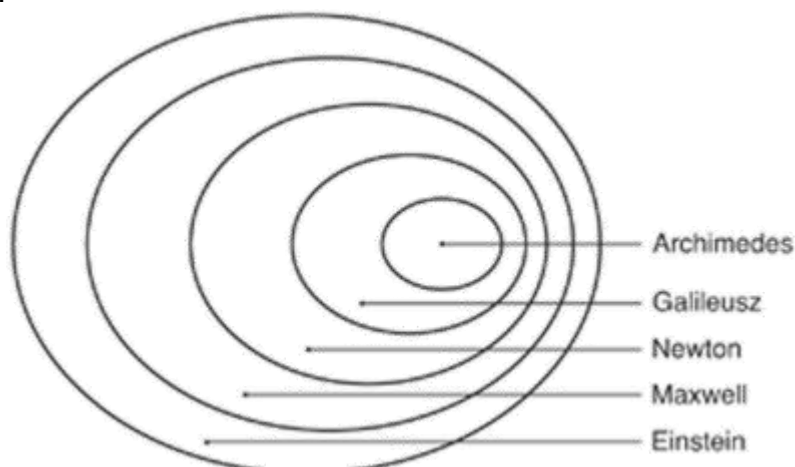


W XVIII i XIX wieku uczeni zaczęli badać zjawisko wykraczające poza zwykłe, powszechne doświadczenia ludzkie. Zjawisko to zwano elektrycznością. Nie była ona normalnie dostępna. Pojawiała się tylko czasami w postaci przerażającej błyskawicy. Zjawiska elektryczne musiano sztucznie wywoływać w laboratoriach po to tylko, by móc je analizować (podobnie dziś niektóre cząstki „produkuje się” w akceleratorach). Elektryczność była wtedy tak samo egzotyczna jak dzisiaj kwarki. Z wolna zaczęto rozu-

mieć, a nawet kontrolować, prądy i źródła napięcia, pola magnetyczne i elektryczne. Prawa rządzące elektrycznością i magnetyzmem zostały rozszerzone i skodyfikowane przez Jamesa Maxwella. Gdy Maxwell, a potem Heinrich Hertz, a potem Guglielmo Marconi, a potem Charles Steinmetz i wielu innych znalazło zastosowanie dla tych idei, radykalnie zmieniło się nasze otoczenie. Elektryczność towarzyszy nam niemal wszędzie, przekazy informacyjne trzeszczą w powietrzu, którym oddychamy. Ale Maxwell w niczym nie uchybił tym, którzy go poprzedzali.



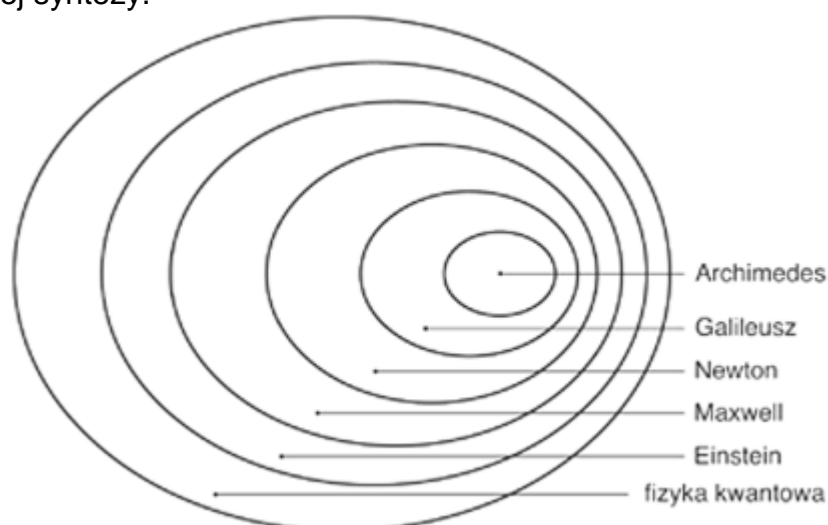
Po odkryciach, których dokonali Newton i Maxwell, niewiele już zostało do zrobienia. Czyż nie? Einstein skupił swą uwagę na samych obrzeżach newtonowskiego Wszechświata. W swych rozważaniach wypuścił się na wielkie głębie; pewne aspekty galileuszowych i newtonowskich założeń niepokoiły go i doprowadziły ostatecznie do sformułowania własnych, odważnych hipotez. Jednak w zakres jego obserwacji wchodziły teraz ciała poruszające się z nadzwyczajną prędkością. Takie zjawiska znajdowały się po prostu poza zasięgiem zainteresowań wcześniejszych obserwatorów. Lecz w miarę jak ludzie zaczęli badać atomy, projektować urządzenia jądrowe i interesować się najwcześniejszymi chwilami istnienia Wszechświata, nagle spostrzeżenia Einsteina nabrały znaczenia.



Teoria grawitacji Einsteina także wykroczyła poza teorię Newtona, aby objąć dynamikę Wszechświata (Newton wierzył, że Wszechświat jest statyczny) i jego ekspansję

od wybuchowych narodzin. Kiedy jednak zastosujemy równania Einsteina do świata Newtona, otrzymamy newtonowskie wyniki.

Teraz chyba mamy już pełen obraz, nieprawdaż? Nie! Musieliśmy jeszcze zajrzeć do wnętrza atomu, a gdy to zrobiliśmy, okazało się, że potrzebujemy pojęć znacznie wykraczających poza świat Newtona (i nie do przyjęcia dla Einsteina). W ten sposób do naszego świata wkroczył atom, jądro i, o ile wiemy, jeszcze drobniejsze składniki. Potrzebowaliśmy fizyki kwantowej. Ale w rewolucji kwantowej nie było niczego, co skasowałoby Archimedesesa, wyparło Galileusza, wypaczyło Newtona czy zbezcześciło względność Einsteina. Raczej odkryto nową dziedzinę, napotkano nowe zjawiska. Nauka sformułowana przez Newtona okazała się niedostateczna i gdy czas się wypełnił, dokonano nowej syntezy.



Przypomnij sobie, drogi Czytelniku, jak w poprzedniej części mówiliśmy o tym, że równanie Schrödingera jest tak sformułowane, aby można było dokonywać obliczeń dotyczących elektronów i innych cząstek. Gdy jednak zastosuje się je do piłek i innych wielkich obiektów, na naszych oczach przekształca się w newtonowskie $F = ma$, czy coś w tym rodzaju. Równanie Diraca, to, z którego wyniknęło istnienie antymaterii, było „udoskonaleniem” równania Schrödingera. Modyfikacja polegała na tym, by można je było zastosować do „szybkich” elektronów, poruszających się z prędkością bliską prędkości światła. Jednak równanie Diraca zastosowane dla powolnych elektronów nagle zmienia się w równanie Schrödingera, tyle że magicznie przekształcone tak, by uwzględniało spin elektronu. Ale pozbyć się Newtona? Nie ma mowy!

Jeśli ten marsz drogą postępu sprawia wrażenie niesłychanie wydajnego, warto zauważyć, że po drodze powstaje także mnóstwo odpadów. Gdy dzięki nowym wynalazkom, nienasyconej ciekawości (i mnóstwu dotacji państwowych) odkryjemy dla obserwacji nowe dziedziny, napływające dane zazwyczaj powodują powstawanie wielu nowych pomysłów, teorii i hipotez. Większość z nich jest fałszywa. We współzawodnictwie o pierwszeństwo na linii frontu jest tylko jeden zwycięzca. Pokonani przepadają na historycznym wysypisku przypisów.

Jak przebiega rewolucja? W każdym okresie zastoju intelektualnego, takiego jak pod koniec XIX wieku, zawsze istnieje zestaw zjawisk, których „jeszcze nie wyjaśniono”. Eksperymentatorzy mają nadzieję, że ich doświadczenia dobiją obowiązującą teorię:

wtedy zastąpi się ją nową, a przy okazji narodzi się kilka wielkich sław. Częściej jednak się zdarza, że albo pomiary są błędne, albo nowatorskie zastosowanie istniejącej teorii okazuje się wystarczające, by uzasadnić dane. Ale nie zawsze. A ponieważ zawsze istnieją trzy możliwości - (1) błędne dane, (2) wystarczająco elastyczna stara teoria, (3) potrzeba nowej teorii - eksperymentowanie jest bardzo fascynującym zajęciem.

Gdy jednak dochodzi do rewolucji, poszerza się zakres stosowalności nauki, a nasz światopogląd może ulec olbrzymim przeobrażeniom. Na przykład Newton stworzył nie tylko prawo powszechnego ciężenia, ale deterministyczną filozofię, która spowodowała, że teologowie przydzielili Bogu zupełnie nową rolę w świecie. Z zasad Newtona wynikały równania matematyczne, które determinowały przyszłość dowolnego układu, jeśli tylko znane były warunki początkowe. Fizyka kwantowa zastosowana do świata atomowego, przeciwnie, zmiękcza ten deterministyczny pogląd, zezwalając indywidualnym zdarzeniom atomowym na luksus nieokreśloności. Zresztą osiągnięcia w innych dziedzinach fizyki zdają się wskazywać na to, że nawet poza światem subatomowym deterministyczny, newtonowski porządek jest zdecydowanie przereklamowany. Systemy składające się na nasz makroświat są z reguły tak bardzo skomplikowane, że wprowadzenie nawet najmniej znaczącej zmiany w warunkach początkowych wywołuje ogromne zmiany rezultatów. Układy tak, wydawałoby się, proste jak woda spływająca ze wzgórza czy para dyndających wahadeł zachowują się „chaotycznie”. Badania nad dynamiką nieliniową, czyli tak zwanymi zachowaniami chaotycznymi, mówią nam, że rzeczywisty świat nie jest nawet w przybliżeniu tak deterministyczny, jak przypuszczano.

Co nie oznacza, że nauka znalazła nagle wiele wspólnego z religiami Wschodu. Jeśli więc, drogi Czytelniku, metafory religijne oferowane przez autorów tekstów porównujących nową fizykę do wschodniego mistycyzmu w jakikolwiek sposób pomagają Ci pojąć nowoczesną rewolucję w fizyce, to jak najbardziej możesz z nich korzystać. Ale metafory są tylko metaforami i pozwolę sobie przytoczyć tu stare powiedzenie: nigdy nie myl mapy z terytorium. Fizyka nie jest religią. Gdyby była, znacznie łatwiej przychodziłoby nam zdobywanie pieniędzy.

9. Akceleratory: one rozkwaszają atomy, nieprawdaż?

SENATOR JOHN PASTORE: Czy cokolwiek, co dotyczy tego akceleratora, wiąże się z bezpieczeństwem naszego kraju?

ROBERT WILSON: Nie, proszę pana, sądzę, że nie.

PASTORE: Zupełnie nic?

WILSON: Zupełnie nic.

PASTORE: Nie ma to związku z żadnymi wartościami?

WILSON: Jedynie z szacunkiem, jakim obdarzamy się nawzajem, z godnością człowieka i z umiłowaniem kultury. Z tym, czy jesteśmy dobrymi malarzami, rzeźbiarzami, wielkimi poetami. Mam na myśli wszystkie te rzeczy, które naprawdę czcimy i szanujemy w naszym kraju i które wzbudzają w nas uczucie patriotyzmu. Nie ma bezpośrednio nic wspólnego z obroną naszego kraju, oprócz tego, że czyni go wartym obrony.

Mamy w Fermilabie pewną tradycję. Co roku pierwszego czerwca o godzinie siódmej rano, niezależnie od pogody cały personel bierze udział w biegu po liczącej 6,5 km

ścieżce utworzonej bezpośrednio nad pierścieniem akceleratora. Biegniemy zawsze w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu rozpędzanych antyprotonów. Mój ostatni, nieoficjalny czas wynosił 38 minut. Obecny dyrektor Fermilabu, mój następca, John Peoples, w pierwszym roku swych rządów wywiesił plakat zapraszający personel do biegu „z młodszym i szybszym dyrektorem”. Faktycznie był szybszy, ale ani on, ani ja nie mogliśmy się równać z antyprotonami. Im jedno okrążenie zajmuje około 22 milionowe sekundy, co oznacza, że każdy antyproton wyprzedzał mnie około 100 milionów razy.

Personel Fermilabu nie ma żadnych szans, by uniknąć tego upokorzenia, ale ostatecznie rachunek się wyrównuje, bo to przecież my planujemy eksperymenty. Doprowadzamy antyprotony do zderzeń z protonami, które pędzą równie szybko w przeciwnym kierunku. W tym rozdziale będziemy mówili o tym, jak to się dzieje.

Nasza dyskusja poświęcona akceleratorom będzie swego rodzaju przerywnikiem. Mknęliśmy dotąd przez stulecia naukowego postępu jak rozpędzona ciężarówka. Zwolnijmy więc nieco tempo naszej narracji i pomówmy nie tyle o odkryciach, czy nawet o fizykach, co o maszynach. Przyrządy były nieodłącznie związane z naukowym postępem od równi pochyłej Galileusza po komorę scyntylacyjną Rutherforda. Teraz przyrządy staną się osią naszej opowieści. Nie sposób zrozumieć dzieje fizyki w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat, nie mając pojęcia o akceleratorach i licznych towarzyszących im detektorach - najważniejszych narzędziach naszej dziedziny. Poznając akcelerator, można wiele dowiedzieć się o fizyce w ogóle, bo urządzenie to ucieleśnia wiele zasad, nad których doskonaleniem fizycy pracowali przez stulecia.

Czasem myślę sobie o wieży w Pizie jako o pierwszym akceleratorze - (prawie) pionowym akceleratorze liniowym, którego do swych badań używał Galileusz. Jednak prawdziwa historia akceleratorów zaczyna się dużo później. Rozwój tych urządzeń ma swe źródło w naszym pragnieniu sięgnięcia w głąb atomu. Jeśli pominiemy Galileusza, historia akceleratorów zaczyna się od Ernesta Rutherforda i jego uczniów, którzy stali się mistrzami w wykorzystywaniu cząstek α do badań wnętrza atomu.

Cząstka α to prawdziwy dar natury. Gdy jakiś naturalny materiał radioaktywny ulega spontanicznemu rozpadowi, wystrzeliwuje te ciężkie, obdarzone dużą energią cząstki. Ich energia wynosi zazwyczaj około pięciu milionów elektronowoltów. Elektronowolt (eV) jest to ilość energii, którą otrzymałby pojedynczy elektron podczas wędrówki od ujemnego do dodatniego bieguna baterii dającej napięcie jednego wolta. Zanim przebrniemy przez parę następnych rozdziałów, elektronowolt stanie ci się, drogi Czytelniku, równie znajomy jak centymetr, kaloria czy megabajt. Oto cztery skróty, z którymi powinieneś się zapoznać, zanim podążymy dalej:

keV - tysiąc elektronowoltów (k = kilo);

MeV - milion elektronowoltów (M = mega);

GeV - miliard elektronowoltów (G = giga);

TeV - bilion elektronowoltów (T = tera).

Dla wyrażenia wielkości wykraczających poza TeV uciekamy się do zapisu mającego postać potęg liczby dziesięć. 10^{12} równe jest właśnie 1 TeV. Nie sposób wyobrazić sobie, by dostępne rozwiązania techniczne pozwoliły nam wykroczyć poza granicę 10^{14} eV. To jest już zakres energii cząstek promieniowania kosmicznego, które stale bombarduje Ziemię. Cząstek tych jest niewiele, ale energia, jaką ze sobą niosą, dochodzi do 10^{21} eV.

Z punktu widzenia fizyki cząstek elementarnych 5 MeV to niewielka energia. Cząstki α , którymi posługiwał się Rutherford, ledwo potrafiły rozbić jądro atomu azotu w trak-

cie pierwszych w dziejach zaplanowanych zderzeń jądrowych. I był to tylko przedsmak wszystkich tych fascynujących rzeczy, które można zgłębiać dzięki podobnym zderzeniom. Teoria kwantowa mówi, że im mniejszy jest obiekt, który badamy, tym więcej potrzebujemy energii. Jest to swego rodzaju ekwiwalent ostrzenia demokrytyjskiego noża. By skutecznie przeciąć jądro, potrzebna jest energia dziesiątków, a nawet setek MeV. Im więcej, tym lepiej.

Czy Bogini stwarza to wszystko w miarę postępu naszych badań?

Dygresja filozoficzna. Fizycy cząstek elementarnych z zapalem zabrali się do budowania coraz większych akceleratorów, o czym zaraz opowiem. Kierowali się przy tym tymi samymi motywami, które przyświecają każdemu innemu przedstawicielowi *Homo sapiens* - ciekawością, wybujałym ego, dążeniem do władzy, chciwością, ambicją... Czasem, w chwilach cichej zadumy nad piwem zastanawialiśmy się razem z kolegami, czy sama Bogini wie, co wyprodukuje nasza następna maszyna; na przykład potwór o mocy 30 GeV, gdy jego budowa dobiegała końca w 1959 roku w Brookhaven. Czy tylko wynajdujemy sobie zagadki, gdy osiągamy coraz wyższe, niesłychane energie? Czy zaniepokojona Bogini patrzy przez ramię Gell-Mannowi, Feynmanowi lub innemu ze swych ulubionych teoretyków, by zobaczyć, co ma zrobić przy tych wielkich energiach? Czy zwołuje rezydujących w niebie aniołów - wielbnego Newtona, Einsteina, Maxwella - by wysłuchać ich sugestii w sprawie tego, co powinno się zdarzyć przy energii równej 30 GeV? Dziwaczny, skokowy rozwój teorii - jak gdyby Bogini stwarzała ją w miarę postępu naszych badań - zdawał się czasem stanowić uzasadnienie dla podobnej opinii. Jednak rozwój astrofizyki i badań promieniowania kosmicznego szybko nam uświadomił, że takie wątpliwości to czysty nonsens. Koledzy, którzy patrzą w gwiazdy, zapewniają nas, że energie 30 GeV, 300 GeV, a nawet 3 miliardy GeV są ściśle związane z historią Wszechświata. Przestrzeń jest dosłownie zalana cząstkami o astronomicznych (ojojoi!) energiach i to, co dziś jest rzadko spotykanym, egzotycznym zdarzeniem dziejącym się w nieskończenie małym obszarze na Long Island, w Batawii czy w Genewie, tuż po narodzinach Wszechświata było czymś zwyczajnym i powszednim.

A teraz wracamy z powrotem do naszych maszyn.

Dlaczego aż tyle energii?

Akcelerator o największej jak dotąd mocy, tevatron¹ w Fermilabie, doprowadza do zderzeń o energii około 2 TeV, czyli 400 tysięcy razy większej niż energia wytwarzana podczas doświadczeń Rutherforda z cząstkami α . Nadprzewodzący superakcelerator (SSC) jest projektowany tak, by osiągał 40 TeV.

Wydaje się, że 40 TeV to ogromna ilość energii. I tak jest w istocie, jeśli całą tę energię zaangażuje się w pojedyncze zderzenie dwóch cząstek. Ale musimy spojrzeć

¹ Nazwa „tevatron” (ang. *tevatron*), podobnie jak „bewatron” (ang. *bevatron*) wiąże się z zakresem osiągniętych przez akcelerator energii: TeV. W wypadku bewatronu chodzi o miliard (ang. *billion*) eV (przyp. red.).

na to zagadnienie z pewnej perspektywy. W akcie zapalenia zapalki uczestniczy około 10^{21} atomów, w reakcji każdego z nich uwalnia się około 10 eV, czyli całkowita energia wynosi 10^{22} eV, co jest równe 10 milionom TeV. W SSC w ciągu sekundy dojdzie do około 100 milionów zderzeń; podczas każdego z nich uwolnione zostanie około 40 TeV, co da w efekcie 4 miliardy TeV, a zatem wielkość porównywalną z energią uwalnianą przez zapalenie zapalki. Jednak istotna różnica polega na tym, że w akceleratorze energia skoncentrowana jest w stosunkowo niewielkiej liczbie cząstek zamiast w miliardach, miliardach i miliardach cząstek, z których składa się każdy okruszek widzialnej materii.

Na cały kompleks akceleratora - od zasilanej ropą naftową elektrowni, przez linie elektryczne po laboratorium, gdzie transformatory przekazują całą energię elektromagnesom i wnętrzem rezonansowym o częstotliwości radiowej - możemy spojrzeć jak na gigantyczne urządzenie (odznaczające się nadzwyczaj małą sprawnością), które służy do koncentrowania i przekazywania chemicznej energii ropy naftowej mniej więcej miliardowi protonów w ciągu sekundy. Gdyby makroskopową ilość ropy naftowej podgrzać tak, aby każdy z atomów osiągnął energię 40 TeV, temperatura tej ropy wynosiłaby 4×10^{17} stopni, czyli 400 tysięcy bilionów kelwinów. Atomy roztopiłyby się i zamiast nich mielibyśmy tylko kwarki. W takim stanie znajdował się cały Wszechświat na mniej niż milionową miliardowej części sekundy po swych narodzinach.

Cóż więc robimy z całą tą energią? Zgodnie z teorią kwantową, jeśli chce się badać coraz mniejsze obiekty, potrzebne są coraz potężniejsze akceleratory. Oto zestawienie określające przybliżoną energię potrzebną do rozłupania rozmaitych interesujących obiektów:

ENERGIA (w przybliżeniu)	ROZMIAR OBIEKTU
0,1 eV	cząsteczka, duży atom 10^{-8} m
1,0 eV	atom 10^{-9} m
1000 eV	rdzeń atomu 10^{-11} m
1 MeV	duże jądro 10^{-14} m
100 MeV	rdzeń jądra 10^{-15} m
1 GeV	neutron albo proton 10^{-16} m
10 GeV	efekty kwarkowe 10^{-17} m
100 GeV	efekty kwarkowe 10^{-18} m (więcej szczegółów)
10 TeV	Boska Cząstka? 10^{-20} m

Zauważ, drogi Czytelniku, jak w miarę zmniejszania się rozmiarów obiektów, w przewidywalny sposób wzrasta energia. Zauważ też, że potrzeba tylko 1 eV, aby badać atomy, ale już 10 miliardów eV, by zacząć badać kwarki.

Akceleratory są jak mikroskopy, których biolodzy używają do badania coraz mniejszych rzeczy. W zwykłych mikroskopach światło oświetla oglądany obiekt, na przykład czerwoną krwinkę. Mikroskopy elektronowe, ukończone narzędzia łowców mikrobów, mają większą zdolność rozdzielczą właśnie dlatego, że elektrony niosą większą energię niż światło używane w mikroskopie optycznym. Mniejsza długość fali elektronów pozwala biologom lepiej „zobaczyć” cząsteczki składające się na komórkę. Długość fali bombardującej wiązki determinuje rozmiar tego, co można dzięki niej „zobaczyć” i zbadać. Dzięki teorii kwantowej wiemy, że w miarę jak maleje długość fali, zwiększa się niesiona przez nią energia; nasza tabela po prostu wyraźnie ukazuje ten związek.

W przemówieniu skierowanym do Brytyjskiego Towarzystwa Naukowego w 1927 roku Rutherford wyraził nadzieję, że pewnego dnia ludzie nauczą się przyspieszać cząstki do energii większych niż te, które dostępne są w procesie rozpadu promieniotwórczego. Przewidywał wynalezienie maszyn zdolnych do wytwarzania napięcia sięgającego milionów woltów. Maszyny takie były potrzebne nie tylko ze względu na oferowaną przez nie moc. Fizycy chcieli wyrzucać więcej pocisków w wybranym kierunku. Źródła cząstek α występujące w przyrodzie nie są nazbyt szczodre: ku tarczy o powierzchni jednego centymetra kwadratowego można było skierować niecały milion cząstek na sekundę. Milion wydaje się sporą liczbą, ale jądra zajmują tylko jedną setną milionowej części powierzchni celu. By zbadać jądro, potrzeba przynajmniej tysiąckrotnie więcej przyspieszanych cząstek (miliard) i, jak już wspomniałem, o wiele większej energii: wiele milionów woltów (fizycy nie byli pewni, jak wiele). W latach dwudziestych wydawało się, że jest to zadanie ponad siły, niemniej w wielu laboratoriach zaczęto nad nim pracować. Rozpoczął się prawdziwy wyścig, by zbudować urządzenie zdolne do przyspieszania wymaganej liczby cząstek przynajmniej do miliona woltów. Zanim omówimy postępy techniki akceleratorowej, powinniśmy poświęcić chwilę jej podstawom.

Szczelina

Bardzo łatwo jest wyjaśnić zagadnienia związane z przyspieszaniem cząstek (uwaga!). Podłącz, drogi Czytelniku, bieguny zwykłej baterii do dwóch metalowych płytek (zwanymi elektrodami) umieszczonych, powiedzmy, w odległości 30 cm od siebie. Ten układ nazwiemy Szczeliną. Zamknij teraz te elektrody w puszcze i usuń z niej powietrze. Cały układ zmontuj w ten sposób, żeby cząstki obdarzone ładunkiem elektrycznym - rolę pocisków odgrywają głównie elektrony i protony - mogły bez przeszkód przechodzić przez szczelinę. Elektron bardzo chętnie pomknie w kierunku dodatniej elektrody, uzyskując przy tym energię (sprawdź na etykiecie baterii) 12 eV. W ten sposób Szczelina przyspiesza. Jeśli metalowa dodatnia elektroda wykonana jest z drucianej siatki zamiast z płytki, większość elektronów przeniknie przez nią, tworząc wiązkę o energii 12 eV. Elektronowolt to bardzo niewielka ilość energii, a my potrzebujemy baterii wytwarzającej miliardy woltów. W żadnym sklepie takiej nie znajdziemy. Dlatego, by osiągnąć takie napięcie, musimy skorzystać z innych niż chemiczne procesów, ale niezależnie od tego, jak wielki jest akcelerator - czy mówimy o urządzeniu Cockrofta-Waltona z lat dwudziestych naszego wieku, czy o projektowanym SSC o obwodzie 85 km - podstawowy mechanizm nie ulega zmianie: szczelina, przy której przekraczaniu cząstki zyskują energię.

W akceleratorze zwykle, praworzędne cząstki uzyskują dodatkową energię. Skąd bierzemy te cząstki? Z elektronami jest bardzo łatwo. Rozgrzejmy drut, aż zacznie się jarzyć, a elektrony popłyną strumieniami. Z protonami też nie ma problemu. Jądro wodoru jest protonem (w jądrach wodoru nie ma żadnych neutronów). Dlatego wszystko, czego nam potrzeba, to zwykły, łatwo dostępny wodór. Można także przyspieszać inne cząstki pod warunkiem, że są trwałe - to znaczy mają długi czas życia - ponieważ przyspieszanie jest procesem czasochłonnym. No i muszą nieść ładunek elektryczny, jako że szczelina na nic się nie przyda, jeśli cząstka jest elektrycznie obojętna. Głównymi kandydatami do przyspieszania są: protony, antyprotony, elektrony i pozytony. Można

także przyspieszać różne jądra - deuterony, cząstki α ; mają one pewne zastosowania. Nietypowe urządzenie budowane jest właśnie na Long Island w Nowym Jorku; będzie ono przyspieszać jądra uranu do miliardów elektronowoltów.

Umasywniacz

Co się dzieje podczas przyspieszania? Łatwa, choć niekompletna odpowiedź brzmi, że zwiększa się prędkość ruchu cząstek. U początków ery akceleratorów takie wyjaśnienie było najzupełniej trafne i wystarczające. Jednak lepszą odpowiedzią jest stwierdzenie, że zwiększa się energia cząstek. Gdy akceleratory zaczęły osiągać coraz większą moc, stało się możliwe nadawanie cząstkom prędkości porównywalnych z prędkością światła. Szczególna teoria względności Einsteina z 1905 roku mówi, że nic nie może poruszać się szybciej niż światło. Dlatego też „prędkość” jest niezbyt użytecznym pojęciem. Na przykład jedna maszyna może przyspieszać protony do prędkości, powiedzmy, równej 99 procentom prędkości światła, a inna, o wiele droższa, zbudowana dziesięć lat po tej pierwszej, pozwala osiągnąć 99,9 procent prędkości światła. Wielkie rzeczy! Idź wytłumacz to teraz senatorowi, który głosował za wydaniem całej tej forsy tylko po to, by uzyskać marne dodatkowe 0,9 procent!

To nie prędkość ostrzy nóż Demokryta i otwiera przed nami nowe obszary. To energia. Proton poruszający się z prędkością równą 99 procentom prędkości światła ma energię równą 7 GeV (bevatron w Berkeley zbudowany w 1955 roku), podczas gdy proton poruszający się z prędkością równą 99,5 procent prędkości światła ma około 30 GeV (Brookhaven AGS, 1960), a proton poruszający się z prędkością równą 99,9 procent prędkości światła ma już 200 GeV (Fermilab, 1972). Toteż teoria względności opisująca zmiany prędkości i energii sprawia, że nie ma sensu mówić o szybkości. Liczy się tylko energia. Jej pokrewną cechą jest pęd, który w wypadku wysokoenergetycznych cząstek można uznać za ukierunkowaną energię. Na marginesie wypada zaznaczyć, że w trakcie przyspieszania cząstka robi się coraz cięższa z powodu związku masy z energią, wyrażonego równaniem $E = mc^2$. Według teorii względności cząstka w stanie spoczynku także ma pewną energię równą $E = m_0c^2$, gdzie m_0 to masa spoczynkowa cząstki. W miarę przyspieszania energia cząstki wzrasta, a zatem zwiększa się także jej masa. Im bardziej zbliżamy się do prędkości światła, tym cięższy staje się przyspieszany obiekt i, w konsekwencji, tym trudniej jest dalej zwiększać jego prędkość. Ale energia wciąż wzrasta. Tak się szczęśliwie składa, że masa spoczynkowa protonu wynosi około 1 GeV, a zatem masa protonu przyspieszonego do energii 200 GeV jest ponad dwieście razy większa od masy protonu zamkniętego w naczyniu z wodorem. Nasz akcelerator w gruncie rzeczy jest więc „umasywniaczem”.

Katedra Moneta, czyli trzynaście sposobów widzenia protonu

Teraz, kiedy dysponujemy już przyspieszonymi cząstkami, co z nimi zrobimy? Mówiąc krótko, zderzamy je ze sobą. Ponieważ to właśnie stanowi sedno procesu, dzięki które-

mu możemy badać materię i energię, musimy dokładniej zająć się zderzeniami. Można zapomnieć o różnych szczegółach dotyczących przyrządów i o tym, jak się przyspiesza cząstki, choćby to było nawet interesujące. Ale zapamiętaj, drogi Czytelniku, że istotą akceleratora są zderzenia.

Sposób, w jaki obserwujemy, a w końcu pojmujemy abstrakcyjny subatomowy świat równie dobrze mógłby zostać wykorzystany do zrozumienia każdej innej rzeczy - na przykład drzewa. Jak przebiega taki proces? Po pierwsze, potrzebne nam jest światło. Użyjmy światła słonecznego. Fotony płyną ze Słońca ku drzewu, odbijają się od jego liści i kory, gałęzi i konarów. Niewielka ich część trafia do naszego oka. Fotony, można powiedzieć, ulegają rozproszeniu na obiekcie w kierunku detektora. Soczewka oka ogniskuje światło na siatkówce. Siatkówka wykrywa fotony i porządkuje je według rozmaitych cech: kolor, odcień, intensywność. Te informacje zostają przesłane do procesora pracującego *on-line* - do potylicznego płatu naszego mózgu, specjalizującego się w przetwarzaniu danych wzrokowych. Wreszcie nasz procesor dochodzi do wniosku: „Na Jowisza, drzewo! Ale śliczne”.

Informacja trafiająca do oka może zostać przefiltrowana przez okulary optyczne lub przeciwsłoneczne, co pogłębia zniekształcenia wprowadzone już przez samo oko. Zadaniem mózgu jest korekcja tych zniekształceń. Zastąpmy oko aparatem fotograficznym i tydzień później, na wyższym poziomie abstrakcji, możemy podziwiać to samo drzewo podczas rodzinnego pokazu slajdów. Kamera wideo może nawet przetworzyć fotony w cyfrową informację elektroniczną: w zera i jedyńki. By nacieszyć się obrazem, trzeba teraz odtworzyć zapis za pomocą telewizora - przetworzyć informację cyfrową z powrotem do postaci analogowej; na ekranie pojawi się drzewo. Gdyby ktoś chciał posłać „drzewo” kolegom naukowcom z planety Ugiza, skorzystałby zapewne z wersji cyfrowej, która najprecyzyjniej i najsprawniej pozwoliłaby przekazać konfigurację, którą Ziemia nazywa drzewem.

Oczywiście, z akceleratorem to nie jest takie proste. Różne rodzaje cząstek używane są na różne sposoby, ale możemy posunąć tę metaforę jądrowych zderzeń i rozpraszania o jeden krok dalej. Drzewo wygląda inaczej rano, inaczej w południe czy o zachodzie słońca. Każdy, kto widział cykl obrazów Moneta przedstawiający fasadę katedry w Rouen o różnych porach dnia, wie, jak wielką rolę odgrywa w nich rodzaj światła. Który obraz jest prawdziwy? Dla artysty katedra ma wiele twarzy. Każda z nich łączy się z własnym światłem: mglisty poranek, ostre kontrasty południowego słońca, bogaty blask późnego popołudnia... W każdym z tych światła ukazuje się inny aspekt prawdy. Fizycy pracują w podobnych warunkach. Potrzebujemy jak najwięcej informacji. Artysta wykorzystuje zmieniające się światło słoneczne. My używamy rozmaitych cząstek: strumieni elektronów, mionów czy neutrin o najrozmaitszych energiach.

Oto, na czym to polega.

O zderzeniu wiadomo na pewno tylko to, jakie cząstki brały w nim udział i jakie powstały w jego efekcie. Co się dzieje w maleńkiej przestrzeni zderzenia? To irytujące, ale prawda jest taka, że nie wiemy. Zupełnie jakby czarna skrzynka osłaniała obszar zderzenia. Wewnętrzne, mechaniczne szczegóły zderzeń nie podlegają obserwacji - zaledwie można je sobie wyobrazić. Dysponujemy tylko modelami sił biorących udział w zderzeniu i tam gdzie to jest istotne - modelami struktury zderzających się obiektów. Wiemy, co bierze udział w zderzeniu oraz co jest jego produktem, i zadajemy sobie pytanie, czy nasz model opisujący zawartość skrzynki pozwala przewidywać właśnie taki, a nie inny przebieg tego procesu.

W Fermilabie mamy program oświatowy dla dziesięciolatków, w którym zapoznujemy ich z tym właśnie problemem. Wręczamy im puste pudełko, które mogą oglądać, dotykać, ważyć, a nawet potrząsać nim. Potem wkładamy coś do pudełka, na przykład drewniany klocek, trzy metalowe kule itp. Wtedy znowu prosimy uczniów, by ważyli, potrząsali, przechylali oraz słuchali i by powiedzieli nam wszystko, co mogą, o zawartości pudełka: podali jego rozmiar, kształt, ciężar i liczbę skrywających się w nim przedmiotów. To ćwiczenie stanowi bardzo pouczającą metaforę naszych rozproszonych eksperymentów. Zdziwiłbyś się, drogi Czytelniku, jak często dzieci poprawnie zgadują.

Wróćmy do dorosłych i do cząstek elementarnych. Powiedzmy, że chcemy dowiedzieć się, jaki jest rozmiar protonu. Skorzystamy ze wskazówki, którą zostawił nam Monnet. Przyjrzymy się protonom oświetlonym różnymi rodzajami „światła”. Czy mogą być punktami? Aby się tego dowiedzieć, fizycy zderzają ze sobą protony o bardzo niskich energiach i badają siły elektromagnetyczne pojawiające się między nimi. Prawo Coulomba mówi, że siły te sięgają aż do nieskończoności i maleją z kwadratem odległości, która dzieli dwa ciała. Oba protony - znajdujący się w tarczy i przyspieszany - są oczywiście dodatnio naładowane. A ponieważ jednoimienne ładunki się odpychają, proton z tarczy z łatwością odpycha powolny proton. Nigdy nie zbliżają się zanadto do siebie. W tym świetle proton rzeczywiście wygląda jak punkt - jak punktowy ładunek elektryczny. Zwiększamy więc energię przyspieszanego protonu. Teraz odchylenia torów rozpraszanych cząstek wskazują na to, że protony zbliżają się do siebie na tyle, by ujawniło się oddziaływanie silne, które spaja w jedną całość części składowe protonu. Oddziaływanie silne jest sto razy potężniejsze od coulombowskiego, ale w przeciwieństwie do niego rozciąga się na bardzo niewielki obszar przestrzeni. Sięga tylko na odległość 10^{-13} cm, a dalej szybko maleje do zera.

Zwiększając energię zderzenia, odkrywamy coraz więcej szczegółów dotyczących oddziaływania silnego. W miarę wzrostu energii zmniejsza się długość fali protonu (przypomnij sobie, drogi Czytelniku, de Broglie'a i Schrödingera). A przecież im mniejsza długość fali, tym więcej szczegółów można wyróżnić w obrazie badanej cząstki. Jedne z najlepszych „zdjęć” protonu zrobił w latach pięćdziesiątych Robert Hofstadter z Uniwersytetu Stanforda. Rolę światła, jakiego ten uczony używał, pełniła wiązka elektronów, a nie protonów. Zespół Hofstadtera wycelował zwartą wiązkę elektronów o energii, powiedzmy, 800 MeV w niewielki zbiornik z ciekłym wodorem. Elektrony bombardowały protony w atomach wodoru, dzięki czemu otrzymywano pewien charakterystyczny obraz: elektrony wyłaniały się ze zderzeń pod różnymi kątami w stosunku do pierwotnego kierunku ich ruchu. Nie różni się to wiele od tego, co robił Rutherford. Jednak elektron, inaczej niż proton, nie podlega silnemu oddziaływaniu jądrowemu, lecz oddziaływaniu elektromagnetycznemu z dodatnio naładowanym protonem. Dzięki temu naukowcy ze Stanford mogli zbadać kształt i rozmieszczenie ładunku w protonie. W ten sposób doszło do ujawnienia rozmiarów protonu. Niewątpliwie nie był punktem. Zmierzono jego promień, który wynosi $2,8 \times 10^{-13}$ cm. Ładunek osiągał wartość największą w centrum i malał do zera przy brzegach tego, co zwiemy protonem. Podobne rezultaty otrzymano powtarzając eksperyment przy użyciu wiązek mionów, które także ignorują oddziaływanie silne. Za tę „fotografię” protonu Hofstadter otrzymał w 1961 roku Nagrodę Nobla.

Około roku 1968 fizycy ze SLAC (Stanford Linear Accelerator Center, czyli Centrum Akceleratora Liniowego w Stanford) bombardowali protony elektronami o znacznie wyższej energii: (8-15) GeV, i zaobserwowali wyraźnie inny przebieg rozpraszania. W

tym twardym świetle proton wyglądał zupełnie inaczej. Użyte przez Hofstadtera elektrony o stosunkowo niskiej energii ujawniły tylko „rozmażany” portret protonu: ładunek rozkładał się tak, że proton wyglądał jak miękka, gąbczasta kuleczka. Elektrony wykorzystane w SLAC sięgały głębiej i pozwoliły dostrzec trzy małe stworki śmigające we wnętrzu protonu. Były to pierwsze dane wskazujące na istnienie kwarków. Nowe dane dopełniały stare, podobnie jak poranny obraz Moneta uzupełniał obraz wieczorny. Po prostu niskoenergetyczne elektrony mogły ukazać jedynie średni rozkład ładunku. Wysokoenergetyczne elektrony ujawniły, że proton zawiera trzy szybko poruszające się składniki punktowe. Dlaczego eksperyment przeprowadzony w SLAC odkrył ten szczegół, a badania Hofstadtera nie? Zderzenia, w których uczestniczą cząstki o dostatecznie wysokiej energii, „zamrażają” kwarki w miejscu i „wyczuwają” punktowe oddziaływania. Zachowanie to jest konsekwencją małych długości fal. Oddziaływania takie powodują rozpraszanie pod dużymi kątami (przypomnij sobie, drogi Czytelniku, Rutherforda i jądro) i znaczne zmiany energii elektronów biorących udział w zderzeniu. Fizycy nazywają takie zjawisko „głęboko nieelastycznym rozpraszaniem”. We wcześniejszych eksperymentach Hofstadtera kwarki wychodziły nieostro i proton sprawiał wrażenie „gładkiej” cząstki o jednorodnym wnętrzu, ponieważ sondujące go elektrony miały zbyt małą energię. Wyobraź sobie, drogi Czytelniku, że robisz zdjęcie trzem maleńkim, szybko migającym żaróweczkom naświetlając film przez minutę. Na zdjęciu ukazałyby się jeden niewyraźny, niezróżnicowany obiekt. W pewnym sensie eksperyment w SLAC polegał na zrobieniu zdjęcia przy zastosowaniu bardzo krótkiego czasu naświetlania; dzięki temu można było łatwo policzyć świetlne punkty.

Ponieważ kwarkowa interpretacja rozpraszania wysokoenergetycznych elektronów była niezwykle i brzemienne w skutki, powtórzono ten eksperyment w Fermilabie i w CERN, używając wiązek mionów o energii dziesięciokrotnie większej niż stosowana w SLAC (150 GeV) oraz neutronów. Miony, tak samo jak elektrony, pozwalają zgłębiać elektromagnetyczną strukturę protonu, ale neutrina, niewrażliwe zarówno na oddziaływania elektromagnetyczne, jak i silne, pozwalają badać rozkład oddziaływania słabego. To ostatnie odpowiada za rozpad promieniotwórczy jądra. Wielkie eksperymenty prowadzone w atmosferze ostrej rywalizacji dały jednobrzmiące wyniki: proton zbudowany jest z trzech kwarków. Poznaliśmy też nieco szczegółów dotyczących ruchów kwarków. To właśnie ich ruch wyznacza właściwości tego, co nazywamy „protonem”.

Szczegółowa analiza tych trzech rodzajów eksperymentów - z elektronami, mionami i neutronami - doprowadziła także do odkrycia nowego rodzaju cząstek: gluonów. Gluony są nośnikami oddziaływania silnego i bez nich po prostu nie udałoby się wyjaśnić otrzymanych danych. Ta sama analiza pozwoliła zrozumieć, jak kwarki poruszają się względem siebie w swym protonowym więzieniu. Dwadzieścia lat takich badań (nazywanych przez fizyków badaniem funkcji struktury) doprowadziło nas do stworzenia wyrafinowanego modelu pozwalającego zinterpretować wszystkie eksperymenty, w których protony, neutrony, elektrony, miony, neutrina, a także fotony, piony i antyprotony zderzają się z protonami. Monet pozostał daleko w tyle. Być może porównanie z wierszem Wallace'a Stevensa *Trzyście sposobów widzenia kosa* byłoby tu bardziej na miejscu.

Jak widać, można się wiele dowiedzieć, próbując zinterpretować to, co-wchodzi-i-co-wychodzi. Poznajemy oddziaływania i sposób, w jaki doprowadzają do tworzenia się złożonych struktur, takich jak protony (zbudowane z trzech kwarków) albo mezony (zbudowane z pary kwark i antykwark). Wobec tak wielkiej liczby komplementarnych

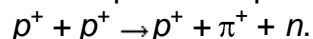
informacji coraz mniej istotny staje się fakt, że nie możemy zajrzeć do czarnej skrzynki, w której odbywa się zderzenie.

Trudno się nie poddać wrażeniu, że mamy do czynienia z sekwencją „ziaren wewnątrz ziaren”. Częsteczka składa się z atomów, rdzeniem atomu jest jądro. Jądro składa się z protonów i neutronów. Proton i neutron zbudowane są z kwarków. Kwarki składają się z... O nie, chwileczkę, stop. Sądzimy, że kwarki nie dają się rozłożyć, choć, oczywiście, nie możemy być tego pewni. Niemniej taka panuje powszechnie opinia. Na razie. A zresztą, Demokryt przecież nie może żyć wiecznie.

Nowa materia: kilka przepisów

Muszę wspomnieć o jeszcze jednym ważnym procesie, towarzyszącym zderzeniom: możemy produkować nowe cząstki. Podobne procesy zachodzą bez przerwy w każdym zakątku domu. Popatrz, drogi Czytelniku, na lampę wytrwale próbującą oświetlić tę ciemną stronicę. Jakie jest źródło tego światła? Elektrony pobudzone energią elektryczną dostarczaną do włókna żarówki albo - jeśli używasz energooszczędnych urządzeń - do gazu lampy fluoroscencyjnej. Elektrony emitują fotony. To właśnie o ten proces chodzi. Ujmując to w bardziej abstrakcyjnym języku fizyki cząstek elementarnych, można powiedzieć, że elektron w wyniku zderzenia może wypromieniować foton. Elektron otrzymuje energię (za pośrednictwem wtyczki w ścianie) podczas procesu przyspieszania.

A teraz uogólnijmy to, co powiedzieliśmy. Kiedy stwarzamy nowe cząstki, musimy liczyć się z prawami zachowania energii, pędu i ładunku oraz respektować wszystkie inne reguły kwantowe. Poza tym obiekt, który jest odpowiedzialny za pojawienie się nowej cząstki, musi być z nią w jakiś sposób „związany”. Przykład: w wyniku zderzenia dwóch protonów powstaje nowa cząstka - pion. Zapisujemy to następująco:



Oznacza to, że proton może się zderzyć z drugim protonem i w wyniku tego powstanie proton, dodatnio naładowany pion oraz neutron. Wszystkie te cząstki podlegają silnemu oddziaływaniu, a powyższa reakcja to typowy przykład procesu krecacji. Można go też rozpatrywać jako „rozpuszczanie” protonu pod wpływem innego protonu na „pi plus” i neutron.

Do innego, rzadkiego i ekscytującego procesu produkcji cząstek, zwanego anihilacją, dochodzi wówczas, gdy materia zderza się z antymaterią. Termin „anihilacja” został tu użyty w jak najściślejszym, słownikowym znaczeniu jako „pozbawianie istnienia”. Gdy cząstka, zwana elektronem, zderza się ze swą antycząstką - pozytonem - obie znikają, a na ich miejsce na moment pojawia się energia w postaci fotonu. Zasady zachowania nie lubią tego procesu, dlatego foton istnieje tylko przelotnie i wkrótce muszą w jego miejsce powstać dwie cząstki - na przykład inny elektron i pozyton. Rzadziej foton może przekształcić się w mion i antimion albo nawet w proton i antyproton. Anihilacja to jedyny proces, w którym masa jest ze stuprocentową wydajnością przetwarzana w energię, zgodnie z einsteinowskim równaniem $E = mc^2$. Podczas wybuchu bomby jądrowej tylko ułamek procentu masy ulega przeobrażeniu w energię. Gdy materia zderza się z antymaterią, znika sto procent masy.

Najważniejszym warunkiem, który musi być spełniony podczas wytwarzania nowych cząstek, jest dostateczna ilość energii. $E = mc^2$ to podstawowe narzędzie, za pomocą

którego prowadzimy nasze obliczenia. Wspominałem na przykład, że w efekcie zderzenia między elektronem i pozytonem może powstać proton i antyproton. Ponieważ energia spoczynkowej masy protonu wynosi około 1 GeV, cząstki biorące udział w zderzeniu muszą mieć przynajmniej 2 GeV, by mogła powstać para proton/antyproton. Jeśli jest więcej energii, wzrasta prawdopodobieństwo takiego zdarzenia i pozostaje pewna nadwyżka w postaci energii kinetycznej nowych cząstek, dzięki czemu łatwiej jest je wykryć.

Olśniewająca natura antymaterii stała się źródłem pielęgnowanego przez literaturę fantastycznonaukową poglądu, że dzięki niej będzie można pewnego dnia rozwiązać kryzys energetyczny. I rzeczywiście, kilogram antymaterii dostarczyłby tyle energii, ile zużywa się dziennie w Stanach Zjednoczonych, gdyż całkowita masa antyprotonu (razem z masą protonu, który ulega zagładzie) przekształca się w energię *via* $E = mc^2$. Podczas spalania węgla lub ropy naftowej tylko miliardowa część masy paliwa zmienia się w energię. W reaktorach rozszczepieniowych liczba ta dochodzi do 0,1 procent. W niecierpliwie oczekiwanych reakcjach termojądrowych osiągnie zapewne (usiądź wygodnie, drogi Czytelniku!) blisko 0,5 procent.

Cząstki z próżni

Można też inaczej ująć to zagadnienie. Wyobraźmy sobie, że cała przestrzeń, nawet pusta, zalana jest cząstkami - wszystkimi, jakich przyroda w swej nieskończonej mądrości może dostarczyć. To nie jest wcale metafora, tylko jedna z konsekwencji teorii kwantowej, zgodnie z którą cząstki rzeczywiście nieustannie pojawiają się w przestrzeni i znikają. Wszystkie te cząstki - najrozmaitszych rodzajów i rozmiarów - trwają tylko przez mgnienie oka. Pojawiają się i szybko znikają - prawdziwy jarmark kipiący aktywnością. Jak długo wszystko to dzieje się w pustej przestrzeni, w próżni, nic się nie dzieje. Jest to przykład kwantowej dziwaczności, ale być może w ten sposób uda nam się wyjaśnić, co się dzieje w trakcie zderzeń. Tu para powabnych kwarków (pewien rodzaj kwarka wraz z odpowiednim antykwarkiem) pojawia się i znika, tam piękny kwark i jego antypiękny brat. O, patrz, a tam, co to takiego? Wszystko jedno: pojawiają się jakiś X i jakiś anti-X, coś, o czym nie mamy pojęcia w 1993 roku.

Tym chaotycznym szaleństwem rządzą jednak pewne zasady. Liczby kwantowe pojawiających się cząstek muszą w sumie dawać zero - zero próżni. Inna zasada: im cięższe obiekty, tym rzadziej się zdarza ich efemeryczne zaistnienie. „Pożyczają” energię od próżni, by trwać przez najmniejszą część sekundy, i zaraz znikają, gdyż muszą zwrócić pożyczkę, zanim upłynie czas określony przez zasadę nieoznaczoności Heisenberga. I oto dochodzimy do kluczowego aspektu całego zagadnienia. Jeśli uda nam się doprowadzić energię z zewnątrz, to wirtualne istnienie zrodzonych z próżni cząstek może przemienić się w rzeczywiste istnienie, które można wykryć w komorze pęcherzykowej albo przy użyciu licznika. Jak dostarczyć tę energię? No cóż, jeśli wysokoenergetyczna cząstka, która dopiero co opuściła akcelerator i poszukuje nowych cząstek, może sobie pozwolić na zapłacenie tej ceny - to znaczy, jeśli jej energia jest równa przynajmniej masom spoczynkowym pary kwarków czy innych iksów - to spleciony zostanie dług zaciągnięty wobec próżni i możemy powiedzieć, że nasza przyspieszona cząstka stworzyła parę cząstek. Oczywiście, im cięższe są te cząstki, które zamierzamy stwo-

rzyć, tym więcej energii potrzebujemy od maszyny. W częściach *A-tom* oraz *I wreszcie Boska Cząstka* spotkamy wiele cząstek, które powołano do istnienia w ten właśnie sposób. Trzeba też dodać, że stworzone przez teorię kwantową wyobrażenie próżni wypełnionej wirtualnymi cząstkami ma także inne, eksperymentalne konsekwencje: na przykład cząstki te modyfikują masę i własności magnetyczne elektronów i mionów. Gdy dojdziemy do eksperymentu „*g minus 2*”, omówimy to dokładnie.

Wyścig

Wyścig, by wybudować urządzenia zdolne do osiągnięcia bardzo wysokich energii, zaczął się już w czasach Rutherforda. W latach dwudziestych przedsiębiorstwa dostarczające prąd elektryczny wspomagały naukowców w tych wysiłkach, ponieważ przekazywanie energii elektrycznej przebiega najwydajniej przy wysokich napięciach. Inny rodzaj motywacji stanowiła potrzeba wytwarzania wysokoenergetycznych promieni Roentgena w celu leczenia nowotworów. Do niszczenia guzów używano już radu, ale był to bardzo kosztowny sposób i sądzono, że promieniowanie o wysokiej energii będzie korzystniejsze. Dlatego przedsiębiorstwa dostarczające prąd oraz medyczne instytuty badawcze wspierały rozwój generatorów wysokiego napięcia. Rutherford, w charakterystyczny dla siebie sposób, objął przewodnictwo, rzucając wyzwanie angielskiej firmie Metropolitan-Vickers Electrical Company, by „dała nam [urządzenie wytwarzające] napięcie rzędu dziesięciu milionów woltów, które zmieściłoby się w pomieszczeniu o rozsądnych rozmiarach, [...] i rurę próżniową zdolną do wytrzymania takiego napięcia”.

Niemieccy fizycy próbowali okiełznać ogromny potencjał wyładowań atmosferycznych występujących podczas alpejskich burz. Między dwoma szczytami górskimi rozpięli izolowany kabel i przechwytywali ładunki dochodzące do 15 milionów woltów, które wytwarzały ogromne łuki elektryczne, przeskakujące między odległymi o 6 metrów kulami metalowymi. Było to spektakularne zjawisko, ale niezbyt pożyteczne. Porzucono tę technikę po tym, jak jeden z naukowców zginął podczas regulowania aparatury.

Porażka niemieckich uczonych dowodzi, że sama moc nie wystarczy. Elektrody szczeliny muszą znaleźć się w rurze albo w komorze próżniowej, wykonanych z bardzo dobrego izolatora. (Wysokie napięcie uwielbia wytwarzać łuki elektryczne, jeśli kształt izolatora nie został bardzo starannie zaplanowany). Poza tym rura taka powinna być dostatecznie mocna, by wytrzymać usunięcie z niej powietrza. Uzyskanie próżni wysokiej jakości jest sprawą zasadniczą; jeśli w rurze pozostałoby zbyt wiele cząstek gazu, zaburzałyby przebieg wiązki. No i osiągnięte napięcie musi być odpowiednio stabilne, by umożliwiała przyspieszanie wielu cząstek. Praca nad tymi i innymi problemami technicznymi trwała od 1926 do 1933 roku, kiedy to wreszcie zdołano je rozwiązać.

W całej Europie trwało zacięte współzawodnictwo; do wyścigu dołączyli także Amerykanie. Generator udarowy zbudowany przez Allgemeine Elektrizität Gesellschaft w Berlinie osiągał 2,4 miliona woltów, ale nie wytwarzał żadnych cząstek. Pomysł ten wykorzystano w Schenectady (w Stanach Zjednoczonych), gdzie General Motors poprawił poziom mocy do 6 milionów woltów. W Carnegie Institution w Waszyngtonie fizyk Merle Tuve doprowadził w roku 1928 do wytworzenia w cewce indukcyjnej prądu o napięciu kilku milionów woltów, ale nie dysponował odpowiednią rurą. Charles Lauritsen z Caltech zbudował rurę próżniową zdolną do wytrzymania napięcia 750 tysięcy woltów. Tuve

zaadaptował rurę Lauritsena i otrzymał wiązkę zawierającą 10^{13} (10 bilionów) protonów na sekundę przy napięciu 500 tysięcy voltów. Teoretycznie ta ilość energii i liczba cząstek wystarczały, aby dotrzeć do jądra. Tuwe rzeczywiście doprowadził do zderzeń między jądrami, ale dopiero w 1933 roku. Do tego czasu dokonali tego już dwaj inni uczeni biorący udział w wyścigu.

Innym pretendentem do palmy pierwszeństwa był Robert Van de Graaff pracujący na Uniwersytecie Yale i w MIT. Zbudował on urządzenie przekazujące ładunki elektryczne wzdłuż bardzo długiego jedwabnego pasa do metalowych kul. W ten sposób potencjał na metalowej kuli wzrastał stopniowo, aż dochodził do kilku milionów voltów i w postaci gigantycznego łuku przeskakiwał w powietrzu do ściany pomieszczenia. To był słynny dziś i znany wszystkim uczniom generator Van de Graaffa. Zwiększanie promienia kuli sprawiało, że odwlekał się moment formowania się łuku, natomiast umieszczanie jej w atmosferze z czystego azotu pozwalało zwiększać napięcie. Ostatecznie generatory Van de Graaffa stały się najchętniej stosowanymi urządzeniami w kategorii do 10 milionów voltów, ale całe lata zajęło doskonalenie i dopracowywanie tego wynalazku.

Wyścig trwał od końca lat dwudziestych do początku lat trzydziestych. O włos zwyciężyła w nim para uczniów Rutherforda: John Cockcroft i Ernest Walton z Laboratorium im. Cavendisha. Dokonali tego (nie mogą powstrzymać się od jęku) dzięki nieocznionej pomocy, której udzielił im teoretyk. Poniósłszy liczne porażki, Cockcroft i Walton nie ustawali w próbach osiągnięcia napięcia miliona voltów. Uważano, że potrzeba co najmniej takiego napięcia, żeby zbadać jądro. Teoretyk rosyjski George Gamow, który odwiedził Nielsa Bohra w Kopenhadze, postanowił skorzystać z okazji i przed powrotem do domu wpadł do Cambridge. Tam wdał się w dysputę z Cockcrofem i Waltonem i powiedział im, że nie potrzebują tak wielkiego napięcia. Według niego, nowa teoria kwantowa przewidywała możliwość przeniknięcia do jądra, nawet jeśli energia cząstek nie była dostatecznie duża, by pokonać siłę odpychania elektrycznego, którą wywiera jądro. Gamow wyjaśnił, że zgodnie z teorią kwantową protony mają własności falowe i dzięki zjawisku tunelowania mogą pokonać barierę wytwarzaną przez ładunek elektryczny jądra, o czym już mówiliśmy w rozdziale 5. Cockcroft i Walton w końcu przyjęli to do wiadomości i od nowa zaprojektowali swe urządzenie tak, aby osiągało napięcie 500 tysięcy voltów. Za pomocą transformatora i obwodu zwielokrotniającego napięcie przyspieszyli protony uzyskane w lampie wyładowczej, podobnej do tej, którą stosował J. J. Thomson do wytwarzania promieni katodowych.

W maszynie Cockcrofta i Waltona wiązki protonów w liczbie około biliona na sekundę rozpędzały się, przemierzając lampę próżniową, i uderzały w tarczę z ołowiu, litu lub berylu. W roku 1930 udało się wreszcie wywołać reakcje jądrowe za pomocą przyspieszonych cząstek. Jądra litu rozbito protonami o energii zaledwie 40 tysięcy eV, znacznie niższej, niż się spodziewano. Było to ważne wydarzenie historyczne. Pojawił się nowy rodzaj noża, choć jeszcze w dość prymitywnej postaci.

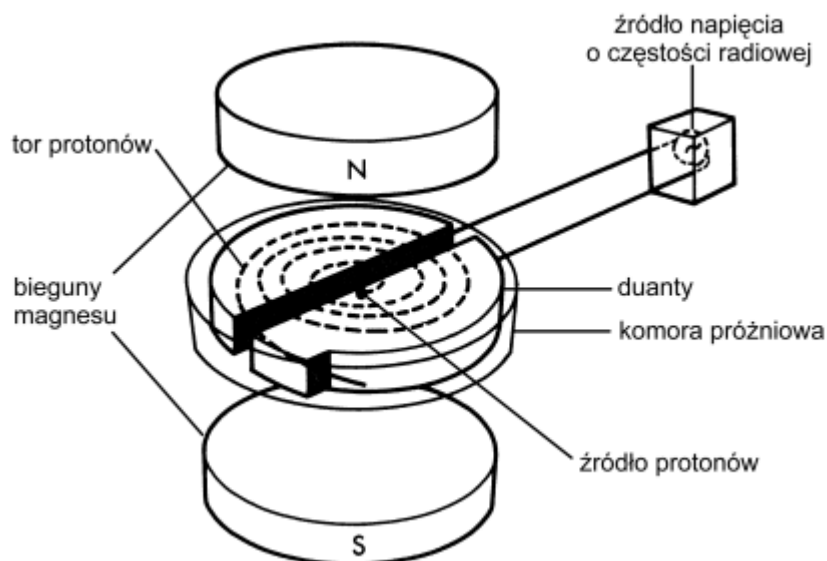
Wpływowa osobistość z Kalifornii

Teraz przenieśmy się wraz z akcją do Berkeley w Kalifornii i poznamy Ernesta Orlando Lawrence'a, przybyłego w 1928 roku z Yale, gdzie dał się poznać jako bardzo zdolny młody fizyk. E. O. Lawrence wynalazł zupełnie inną technikę przyspieszania czą-

stek w maszynie zwanej cyklotronem, za co otrzymał Nagrodę Nobla w 1939 roku. Nieobce mu były niezgrabne maszyny elektrostatyczne, które wymagały ogromnych napięć i łatwo ulegały awariom. Lawrence uważał, że musi istnieć jakiś lepszy sposób. Gdy studiował literaturę w poszukiwaniu metod otrzymywania wysokich energii bez pomocy wysokiego napięcia, natknął się na publikację norweskiego inżyniera Rolfa Wideröe. Wideröe zauważył, że jeśli się przepuści cząstkę przez dwie szczeliny pod rząd, to można podwoić jej energię nie podwajając napięcia. To zjawisko stanowi podstawę konstrukcji urządzenia, zwanego akceleratorem liniowym. Szczeliny umieszczane są w nim jedna za drugą, a mijająca je cząstka przy każdej z nich zyskuje nową porcję energii.

Dzięki artykułowi Wideröe Lawrence'owi przyszedł do głowy jeszcze lepszy pomysł. Czemu by nie użyć wielokrotnie tej samej szczeliny z umiarkowanym napięciem? Lawrence rozumował następująco: gdy naładowana cząstka porusza się w polu magnetycznym, jej tor ulega zakrzywieniu i tworzy okrąg. Promień okręgu zależy od siły magnesu (silny magnes - mały promień) i od pędu cząstki (duży pęd - duży promień). Pęd cząstki jest po prostu równy iloczynowi masy cząstki i jej prędkości. Oznacza to, że silny magnes będzie prowadził cząstkę po małym okręgu, ale jeśli nabierze ona energii - a co za tym idzie, zwiększy się jej pęd - wzrośnie także promień okręgu, po którym wędruje.

Wyobraź sobie, drogi Czytelniku, pudło na kapelusze umieszczone między północnym a południowym biegunem ogromnego magnesu. Niech pudło będzie zrobione z jakiegoś niemagnetycznego, ale mocnego tworzywa, na przykład z mosiądzu lub stali. Wypompujemy z niego powietrze. W środku umieścimy dwa, niemal całkowicie wypełniające wnętrze pudła, obiekty w kształcie wydrążonych połówek dysku (zwane fachowo duantami). Zwróćmy ich proste brzegi ku sobie, pozostawiając między nimi niewielką szczelinę. Przypuśćmy, że jeden duant jest naładowany dodatnio, a drugi ujemnie, i że różnica potencjałów wynosi 1000 V. Strumień protonów wytwarzany (nieważne w jaki sposób) w pobliżu środka układu kierujemy w poprzek szczeliny od dodatniego duantu do ujemnego. Przechodzące przez szczelinę protony zyskują energię 1000 eV i powiększa się promień okręgu, po którym się poruszają, ponieważ wzrósł ich pęd. Protony mkną po kolistym torze wewnątrz duantu i gdy znów pojawiają się w pobliżu krawędzi szczeliny - dzięki zmyślnemu sposobowi przełączania napięcia - pociąga je ujemny potencjał po drugiej stronie. Znowu przyspieszają i mają już 2000 eV. Proces przebiega dalej. Za każdym razem, gdy protony przekraczają szczelinę, zyskują 1000 eV. W miarę zwiększania się pędu coraz usilniej próbują uwolnić się od krępującej je mocy magnesu: nieustannie wzrasta promień toru, po którym krążą. W rezultacie protony mkną po spirali od centrum układu ku jego obwodowi. Tu trafiają w tarczę, dochodzi do zderzenia i zaczynają się badania.



Sprawą najważniejszą w cyklotronie jest takie dopasowanie zmian napięcia, by zawsze po drugiej stronie szczeliny czekał na protony ujemnie naładowany duant. Ujemny potencjał musi szybko skakać z jednego duantu na drugi w sposób idealnie zsynchronizowany z ruchem protonów. Zadajesz sobie pewnie pytanie, drogi Czytelniku, czy zsynchronizowanie zmian napięcia z ruchem protonów, które w miarę przyspieszania zataczają coraz większe i większe kręgi, nie sprawia kłopotu? Odpowiedź brzmi: nie. Lawrence odkrył, że dzięki boskiej przemyślności protony w swej wędrówce kompensują wydłużanie się ich drogi zwiększaniem prędkości. Każdą połowę okręgu pokonują dokładnie w tym samym czasie; zjawisko to nazywamy przyspieszaniem rezonansowym. Aby dopasować zmiany napięcia do ruchu protonów, trzeba mieć źródło zmiennego napięcia o stałej częstotliwości. Technikę wytwarzania takiego prądu już dawno opanowała radiofonia. Stąd też nazwa mechanizmu przełączającego w przyspieszaniu cyklotronowym: generator częstotliwości radiowej. W układzie takim protony przybywają do krawędzi dokładnie w tym czasie, kiedy na przeciwległym duancie jest maksymalny ujemny potencjał.

Lawrence opracował teoretyczne podstawy konstrukcji cyklotronu w latach 1929-1930. Później zaprojektował urządzenie, w którym protony wykonywały sto okrążeń. Podczas każdego obiegu miały po kolejnym przekroczeniu szczeliny zyskiwać 10 tysięcy eV. W ten sposób powstawałaby wiązka o energii 1 MeV ($10\,000\text{ eV} \times 100\text{ okrążeń} = 1\text{ MeV}$). Wiązka ta miała być „pożyteczna dla badań jądra atomowego”. Pierwszy taki cyklotron, zbudowany przez Stanleya Livingstone'a, ucznia Lawrence'a, osiągnął jedynie 80 keV (80 tysięcy eV). Lawrence zaczął wtedy działalność na wielką skalę. Otrzymał ogromną dotację w wysokości tysiąca (!) dolarów na zbudowanie urządzenia mogącego doprowadzić do rozbicia jądra. Płyty pełniące funkcję biegunów magnesu miały 27 cm średnicy. Maszyna ta w roku 1932 przyspieszała protony do bardzo wysokiej energii 1,2 MeV. Protony te zderzano z atomami litu i innych pierwiastków zaledwie w parę miesięcy po podobnym osiągnięciu grupy Cockcrofta i Waltona z Cambridge. Lawrence zajął wprawdzie drugie miejsce, ale i tak mógł się czuć zwycięzcą.

Wielka nauka i genius loci Kalifornii

Lawrence był człowiekiem o niespotykanej energii i zdolnościach. Był ojcem Wielkiej Nauki. Termin ten odnosi się do działalności ogromnych scentralizowanych placówek badawczych, wielce złożonych i kosztownych, w których współpracuje ze sobą bardzo wielu naukowców. Ewoluuując, Wielka Nauka wykształciła nowy styl prowadzenia badań - prace zespołowe. Pojawiły się też specyficzne problemy socjologiczne, o których jeszcze pomówimy. Od czasów Tychona Brahego, pana Uraniborgu, obserwatorium na wyspie Hven, nie widziano nikogo podobnego do Lawrence'a. Sprawił on, że Stany Zjednoczone zaczęły się liczyć w świecie fizyki jako poważny partner w dziedzinie badań eksperymentalnych. Przyczynił się do wytworzenia tej romantycznej, otaczającej Kalifornię atmosfery, która charakteryzuje się fascynacją nowinkami technicznymi i zamiłowaniem do skomplikowanych i kosztownych przedsięwzięć. Wszystko to stanowiło pociągające wyzwanie dla młodej Kalifornii, a także dla całych młodych Stanów Zjednoczonych.

W roku 1934 Lawrence wytwarzał już wiązki deuterionów o energii 5 MeV za pomocą cyklotronu o średnicy 95 cm. Deuteron, jądro składające się z jednego protonu i jednego neutronu, został odkryty w 1931 roku. Okazało się, że lepiej niż proton nadaje się do zapoczątkowywania reakcji jądrowych. W roku 1936 Lawrence dysponował już wiązką o energii 8 MeV. W roku 1939 maszyna o średnicy półtora metra osiągała 20 MeV. Kolejne monstrum, którego budowę rozpoczęto w 1940 roku, a zakończono po wojnie, miało magnes ważący 10 tysięcy ton! Ze względu na użyteczność cyklotronów przy rozwiązywaniu tajemnic jądra zaczęto je budować na całym świecie. W medycynie zastosowano je do leczenia nowotworów. Wiązka cząstek skierowana na nowotwór stanowi niszczącą dawkę energii. Obecnie w szpitalach rozsianych po całych Stanach Zjednoczonych używa się ponad tysiąca cyklotronów. Jednak w placówkach badawczych zajmujących się fizyką cząstek elementarnych porzucono cyklotrony dla nowego typu urządzeń.

Synchrotron: tyle okrążeń, ile chcesz

Dążenie do otrzymywania coraz wyższych energii nasiliło się i ogarnęło cały świat. Badając nowy zakres energii, zawsze dokonywano nieoczekiwanych odkryć. Jednocześnie pojawiały się też nowe zagadki, co wzmacniało chęć osiągnięcia jeszcze wyższych energii. Bogactwo przyrody zdawało się czekać ukryte w jądrowym i subjądrowym świecie.

Możliwości cyklotronu są z definicji ograniczone. Ponieważ cząstki poruszają się po spirali ku zewnętrznej krawędzi, liczba okrążeń jest w sposób oczywisty określona przez rozmiary urządzenia. By umożliwić protonom wykonanie większej liczby okrążeń i uzyskanie większej energii, potrzebny jest większy cyklotron. Pole magnetyczne musi obejmować cały obszar, który zajmuje spirala, więc magnesy powinny być bardzo duże i bardzo... kosztowne. Na scenę wkracza synchrotron. Jeśli cząstka będzie się poruszać nie po spiralnej, lecz po kołowej orbicie o ustalonym promieniu, to wystarczyłoby tylko wąski magnes rozciągający się wzdłuż tej orbity. W miarę jak cząstki nabierają energii, pole magnetyczne mogłoby być zwiększane synchronicznie, tak aby krążyły one po orbicie o stałym promieniu. Sprytnie! W ten sposób można zaoszczędzić całe tony żela-

za, ponieważ rozmiary magnesów ustawionych poprzecznie do toru ścieżki można teraz zredukować do kilku centymetrów zamiast dotychczasowych metrów.

Zanim zacznę omawiać osiągnięcia będące udziałem ostatniego dziesięciolecia, muszę wspomnieć o dwóch istotnych faktach. W cyklotronie naładowane cząstki - protony lub deuterony - odbywają tysiące okrążeń w komorze próżniowej umieszczonej między dwoma biegunami magnesu. Aby powstrzymać cząstki przed uciekaniem na boki i zderzeniami ze ścianą komory, absolutnie nieodzowne było opracowanie niezawodnej metody ich ogniskowania. Podobnie jak soczewka skupia światło latarki, tworząc z niego niemal równoległą wiązkę, tak tu wykorzystuje się siłę magnetyczną, by uformować cząstki w bardzo wąski strumień.

W cyklotronie ogniskowanie odbywa się dzięki zmianom natężenia pola magnetycznego, gdy proton odchyła się w kierunku zewnętrznej krawędzi magnesu. Robert R. Wilson, młody student Lawrence'a, późniejszy budowniczy Fermilabu, jako pierwszy zrozumiał istotną, acz subtelną rolę, którą odgrywają siły magnetyczne w zapobieganiu ucieczce protonów. W pierwszych synchrotronach biegunom nadawano specjalnie taki kształt, by zapewnić działanie tych sił. Później do skupiania cząstek zaczęto stosować magnesy kwadropolowe (z dwoma biegunami północnymi i dwoma południowymi), podczas gdy osobny, dipolowy magnes utrzymywał je na orbicie. Tawatron w Fermilabie - uruchomiona w 1983 roku maszyna wytwarzająca energię sięgającą bilionów eV - stanowi dobry przykład takiego rozwiązania. Cząstki są utrzymywane na kołowej orbicie za pomocą nadprzewodzących magnesów o wielkiej mocy w podobny sposób, w jaki tory prowadzą pociąg po łuku zakrętu. Komora, w której wędrują protony i w której panuje próżnia wysokiej jakości, została wykonana ze stalowej (niemagnetycznej) rury o owalnym przekroju. Ma szerokość około 7 cm i wysokość 5 cm. Tkwi w środku między dwoma biegunami magnesu. Każdy z dipoli magnesu sterującego ma około 7 metrów długości, a każdy z kwadropoli - około 1,2 metra. Potrzeba ponad stu magnesów, aby pokryć całą długość komory. Wszystko to - komora wraz z magnesami - opisuje okrąg o promieniu kilometra. Urządzenie to jest zatem nieco większe od pierwszego modelu Lawrence'a o promieniu 10 cm. Wyraźnie uwidacznia się tu przewaga synchrotronu. Na pokrycie synchrotronu potrzeba wprawdzie wielu magnesów, ale są one stosunkowo cienkie i szerokie tylko na tyle, by przykryć komorę próżniową. Gdyby tawatron był cyklotronem, potrzebowalibyśmy magnesu z biegunami o średnicy 2 kilometrów, który objąłby swym wpływem urządzenie o obwodzie 6 kilometrów!

Cząstki wykonują 50 tysięcy okrążeń na minutę. W ciągu dziesięciu sekund przemierzają 3,2 miliona kilometrów. Za każdym razem, gdy mijają szczelinę - a właściwie ciąg specjalnie skonstruowanych wnek - zmieniające się z częstością radiową napięcie podwyższa ich energię o 1 MeV. Magnesy, które utrzymują protony na kursie podczas całej podróży, dopuszczają, by odchylenie od wyznaczonego toru sięgało co najwyżej trzech milimetrów. Nie jest to może idealna dokładność, ale całkowicie wystarcza. To tak, jakby celując ze strzelby w komara siedzącego na Księżycu trafić w niewłaściwe oko. Aby utrzymać protony na stałej orbicie podczas procesu przyspieszania, wzrost siły magnesów należy precyzyjnie zsynchronizować ze wzrostem energii protonów.

Drugi ważny szczegół związany jest z teorią względności: protony robią się wyraźnie cięższe, gdy ich energia przekracza 20 MeV. Ten wzrost masy zaburza rezonans cyklotronowy, odkryty przez Lawrence'a, polegający na tym, że poruszający się po spirali proton przebywa dłuższą drogę z większą prędkością, tak że każdą połowę okrążenia w cyklotronie pokonuje w dokładnie takim samym czasie. Dzięki temu możliwa jest

synchronizacja ruchu protonów z napięciem na szczelinie, które zmienia się ze stałą prędkością. Przy wyższych energiach wydłuża się czas potrzebny na dokonanie okrążenia i nie można już dłużej stosować napięcia o stałej częstotliwości radiowej. Aby zrównoważyć to spowolnienie, częstość zmian przykładanego napięcia musi się zmieniać, dlatego dalsze przyspieszanie coraz cięższych protonów wymaga użycia napięcia o modulowanej częstotliwości. Synchrociklotron - cyklotron o modulowanej częstotliwości - był najwcześniejszym przykładem wpływu, jaki teoria względności wywiera na rozwiązania techniczne stosowane w akceleratorach.

W synchrotronie problem ten został rozwiązany w jeszcze elegantszy sposób. Rzecz jest trochę skomplikowana, ale w zasadzie chodzi o to, że prędkość ruchu cząstki (99 i jakaś dowolna część procentu prędkości światła) pozostaje właściwie stała. Przypuśćmy, że cząstka przekracza szczelinę w tym momencie cyklu, kiedy przyspieszające napięcie wynosi zero. Nie ma przyspieszenia. Zwiększamy nieco natężenie pola magnetycznego: cząstka zatacza trochę ciaśniejszy krąg i pojawia się w szczelinie odrobinę wcześniej, kiedy pole zmieniające się z częstością radiową jest w fazie przyspieszającej. Wzrasta masa cząstki, zwiększa się promień orbity i znowu jesteśmy w sytuacji wyjściowej, ale dysponujemy już wyższą energią: mamy do czynienia z samoregulującym się układem. Jeśli cząstka zyskuje zbyt wiele energii (masy), zwiększy się promień jej orbity i następnym razem pojawi się w szczelinie ciut później, czyli spotka tam spowolniające napięcie, które skoryguje błąd. Zwiększanie natężenia pola magnetycznego przynosi w efekcie zwiększanie masy/energii naszej cząstki. Metoda ta opiera się na tak zwanej stabilności fazowej, którą omówię w następnym rozdziale.

Ike i piony

Jeden z pierwszych akceleratorów był mi bardzo bliski i drogi - synchrociklotron o mocy 400 MeV należący do Uniwersytetu Columbia. Zbudowano go na terenie, który jest własnością uniwersytetu, a znajduje się nad rzeką Hudson w stanie Nowy Jork, całkiem blisko Manhattanu. Posiadłość Ben Nevis, nazwana tak na cześć pewnej szkockiej góry, została założona w czasach kolonialnych przez Alexandra Hamiltona. Później przeszła na własność rodziny DuPontów i w końcu - Uniwersytetu Columbia. Cyklotron Nevis, zbudowany w latach 1947-1949, był jednym z najbardziej produktywnych akceleratorów wszech czasów. W ciągu dwudziestu kilku lat (w okresie od 1950 do 1972 roku) wyprodukował ponad 150 doktorów fizyki, z których blisko połowa kontynuowała prace badawcze w dziedzinie fizyki wysokich energii i została profesorami w Berkeley, Stanford, Caltechu, Princeton i w wielu innych tego typu podejrzanych instytucjach. Druga połowa zajmowała się wszystkim po trochu: małe uczelnie, laboratoria rządowe, administrowanie nauką, badania dla potrzeb przemysłu, inwestycje bankowe...

Byłem doktorantem, gdy prezydent (uniwersytetu) Dwight Eisenhower dokonał uroczystego otwarcia nowego urządzenia w czerwcu 1950 roku, podczas małej ceremonii na trawnikach przepięknej posiadłości - wspaniałe drzewa, krzewy, parę czerwonych ceglanych budynków - chylącej się ku majestatycznej rzece Hudson. Po stosownej dawce krasomówstwa, Ike wcisnął guzik i z głośników posypały się wzmocnione trzaski wydawane przez liczniki Geigera, wskazujące na obecność promieniowania. Promieniowanie to pochodziło ze źródła radioaktywnego, które trzymałem w pobliżu licznika,

ponieważ w tym właśnie momencie akcelerator postanowił się zepsuć. I nie nigdy się o tym nie dowiedział.

Dlaczego właśnie 400 MeV? W roku 1950 uwaga uczonych koncentrowała się wokół pionu, inaczej zwanego też mezonem π . Jego istnienie przewidział japoński teoretyk Hideki Yukawa. Sądzono, że cząstka ta stanowi klucz do zrozumienia natury silnych oddziaływań, która wciąż jeszcze pozostawała zupełnie nieznaną. Dziś myślimy o silnym oddziaływaniu w kategoriach gluonów. Wtedy jednak piony latające w tę i z powrotem między protonami i neutronami, by spajać je mocno w jądrze, stanowiły klucz do rozwiązania zagadki, dlatego musieliśmy je wytwarzać i badać. Aby w wyniku zderzeń jądrowych powstawały piony, cząstka wychodząca z akceleratora musi mieć energię większą niż $m_{\text{pion}}c^2$, czyli większą od energii masy spoczynkowej pionu. Mnożąc masę pionu przez kwadrat prędkości światła otrzymujemy 140 MeV - taka właśnie jest ta energia. Ponieważ tylko niewielka część energii biorącej udział w zderzeniu zostaje wykorzystana przy produkcji nowej cząstki, potrzebna nam była pewna nadwyżka energetyczna i w ten sposób ostatecznie stanęło na 400 MeV. Nevis stał się fabryką pionów.

Damy Beppa

Ale chwileczkę, najpierw słowo o tym, skąd w ogóle dowiedzieliśmy się o istnieniu pionów. Pod koniec lat czterdziestych naukowcy pracujący na Uniwersytecie w Bristolu, w Anglii, zauważyli, że cząstki α , przechodząc przez emulsję fotograficzną, „pobudzają” napotkane po drodze cząsteczki. Po wywołaniu filmu widać było przez mikroskop o niewielkim powiększeniu wyraźny ślad wyznaczony przez cząsteczki bromku srebra. Grupa z Bristolu przygotowywała porcje płyt bardzo grubo powleczonych emulsją i za pomocą balonów posyłała je do górnych rejonów atmosfery, gdzie intensywność promieniowania kosmicznego jest znacznie większa niż na poziomie morza. Energia tego naturalnego źródła promieniowania znacznie przewyższała cheraławe 5 MeV cząstek α Rutherforda. To właśnie dzięki tym emulsjom wystawionym na działanie promieniowania kosmicznego po raz pierwszy wykryto pion. Dokonali tego: Cesare Lattes, Brazylijczyk, Giuseppe Occhialini, Włoch, i Cecil F. Powell, Anglik.

Najzabawniejszą osobowością tego tria był Occhialini, znany wśród przyjaciół jako Beppo. Amator speleolog i niepoprawny dowcipniś, był on siłą napędową grupy pracującej w Bristolu. Przystosował grupę młodych kobiet do mrówczej pracy polegającej na badaniu owych emulsji pod mikroskopem. Mój promotor, Gilberto Bernardini, bliski przyjaciel Beppa, odwiedził go raz w Bristolu. Ktoś poinformował go - płynną angielszczyzną, z której zrozumieniem Bernardini miał pewne kłopoty - gdzie znajdzie Beppa. Gość szybko zgubił się w gmachu laboratorium. Wreszcie natrafił na gabinet, gdzie kilka układnych Angielek siedziało przy mikroskopach i klęło po włosku takim żargonem, którego nie powstydzono by się nawet w genueńskim porcie. „*Ecco!* - zawołał Bernardini. - Tu jest laboratorium Beppa”.

Ślady utrwalone w emulsji wykazywały, że cząstka - pion - wpadała tam z dużą prędkością, stopniowo zwalniała (gęstość ziaren bromku srebra zwiększa się, gdy cząstka wytraca prędkość) i w końcu się zatrzymywała. Na końcu śladu pojawiała się nowa, obdarzona dużą energią cząstka i umykała w dal. Pion jest cząstką nietrwałą, w ciągu setnej części mikrosekundy rozpada się na mion (to ta nowa cząstka pojawiająca się na końcu śladu) i coś innego. Tym czymś innym, co nie pozostawia śladu w emulsji,

okazało się neutrino. Reakcję tę zapisuje się następująco: $\pi \rightarrow \mu + \nu$. Oznacza to, że pion daje początek mionowi i neutrino. Ponieważ ślady w emulsji nie dostarczają żadnej informacji na temat czasu trwania poszczególnych zjawisk, trzeba było bardzo starannie przeanalizować ślady kilku takich wyjątkowych zdarzeń, aby zrozumieć, z jaką cząstką mamy do czynienia i jak się ona rozpada. Problem polegał jednak na tym, że korzystając z promieniowania kosmicznego, można było zaobserwować tylko kilka zdarzeń z udziałem pionu w ciągu roku. Podobnie jak w wypadku rozbijania jąder atomowych, niezbędne okazały się akceleratory o odpowiednio dużej mocy.

Oprócz maszyny Nevis, piony zaczął produkować także 4,5-metrowy cyklotron Lawrence'a w Berkeley. Wkrótce dołączyły do nich synchrociklotrony w Rochesterze, Liverpoolu, Pittsburghu, Chicago, Tokio, Paryżu i Dubnej. Badano tam silne oddziaływania pionów z neutronami i protonami, a także słabe oddziaływania ujawniające się w rozpadzie promieniotwórczym pionu. Inne urządzenia - na Uniwersytecie Cornell, w Caltech i Berkeley oraz na Uniwersytecie Stanu Illinois - do produkcji pionów używały elektronów, ale największe sukcesy odnosiły synchrociklotrony protonowe.

Pierwsza wiązka zewnętrzna: przyjmujemy zakłady

Mamy więc lato roku 1950, maszyna jest sparaliżowana bólami rodzenia, a ja rozpaczliwie potrzebuję danych, żeby uzyskać doktorat i zacząć zarabiać na życie. Wszystko wówczas kręciło się wokół pionów. Bombarduj kawałek miedzi, węgla, czy czegokolwiek, co ma jądro, wiązką protonów o energii 400 MeV, a otrzymasz piony. Ośrodek w Berkeley zatrudnił Lattes, by nauczył fizyków, jak naświetlać i wywoływać czułe emulsje, podobne do tych, które z takim powodzeniem stosowano w Bristolu. Do komory próżniowej wkładano stos takich płytek i pozwalano protonom bombardować tarczę w ich pobliżu. Korzystając ze śluzy powietrznej, zabierano płytki, wywoływano je (tydzień wysiłków), a potem poddawano oględzinom pod mikroskopem (miesiące!). Wszystkie te starania przyniosły zespołowi z Berkeley zaledwie kilkadziesiąt zdarzeń z udziałem pionów. Musiał istnieć jakiś prostszy sposób! Problem polegał na tym, że aby zarejestrować piony, detektory cząstek musiały się znaleźć wewnątrz akceleratora, w strefie silnego działania magnesów. W tej sytuacji rzeczywiście jedynym praktycznym rozwiązaniem były te stosiki płytek. Bernardini planował eksperyment podobny do przeprowadzonego w Berkeley. Duża, elegancka komora mgłowa, którą zbudowałem w ramach przygotowań do doktoratu, była znacznie lepszym detektorem, ale nigdy by się nie zmieściła między bieguny magnesu wewnątrz akceleratora, nie mówiąc już o tym, że nie przeżyłaby panującego tam silnego promieniowania. Betonowa ściana o grubości ponad trzech metrów oddzielała magnes cyklotronu od reszty laboratorium. Jej zadanie polegało na tłumieniu zbłąkanego promieniowania.

John Tinlot był nowym asystentem, który przybył na Uniwersytet Columbia ze słynnej grupy Brunona Rossiego, badającej w MIT promieniowanie kosmiczne. Tinlot uosabiał istotę fizyki: jako nastolatek był już wysokiej klasy skrzypkiem, ale po wielu rozterkach podjął decyzję, że zostanie fizykiem, i zaniechał grania na skrzypcach. Był pierwszym młodym doktorem, z którym przyszło mi pracować, i bardzo dużo się od niego nauczyłem. Nie tylko fizyki. John miał genetycznie uwarunkowaną skłonność do hazardu: czarny Piotruś, ruletka, poker - dużo pokera. Grywaliśmy podczas eksperymentów w oczekiwaniu na dane. Grywaliśmy w czasie wakacji, w pociągach i samolotach. Był to

umiarkowany sposób uczenia się fizyki, jako że swoje przegrane kompensowałem u innych graczy - studentów, techników, strażników - których werbował John. Nie miał litości.

Siedzieliśmy z Johnem na podłodze jeszcze-nie-zupełnie-pracującego akceleratora, piliśmy piwo i dyskutowaliśmy o świecie. „Co tak naprawdę dzieje się z pionami wylatującymi z tarczy?” - zapytał nagle. Nauczyłem się już, że lepiej w takich sytuacjach zachować ostrożność, bo John był hazardzistą zarówno na wyścigach konnych, jak i w laboratorium. „No, jeśli tarcza jest wewnątrz maszyny [a musiała być, bo jeszcze nie wiedzieliśmy, jak wyprowadzić protony z cyklotronu], magnes rozpyli je na wszystkie strony” - odpowiedziałem ostrożnie.

JOHN: Niektóre wylecą z urządzenia i uderzą w osłonę?

JA: Jasne, tylko że będą wszędzie.

JOHN: A może byśmy tak sprawdzili?

JA: Jak?

JOHN: Prześledzimy tory cząstek w polu magnetycznym.

JA: Ale przecież to wymaga pracy [był piątek, godzina ósma wieczorem].

JOHN: Mamy tablice z pomiarami pól magnetycznych?

JA: Właśnie miałem zamiar iść do domu.

JOHN: Użyjemy tych zwojów papieru pakowego i wykreślimy ścieżki pionów w skali 1:1.

JA: Może w poniedziałek?

JOHN: Bierz suwak logarytmiczny [był rok 1950], a ja będę rysował.

No cóż, w sobotę o czwartej nad ranem dokonaliśmy fundamentalnego odkrycia, które miało zmienić sposób, w jaki korzystamy z cyklotronów. Prześledziliśmy około osiemdziesięciu fikcyjnych cząstek wylaniających się z tarczy, która znajduje się w akceleratorze. Rozpatrzyliśmy rozmaite możliwe kierunki i energie: 40, 60, 80 i 100 MeV. Ku naszemu zaskoczeniu, cząstki nie rozbiegały się na wszystkie strony, lecz - na skutek własności pola magnetycznego w pobliżu i poza krawędzią magnesu cyklotronu - ich tor ulegał zakrzywieniu wokół maszyny i formowała się z nich wąska wiązka. Odkryliśmy tak zwane ogniskowanie na obrzeżu pola (*fringe field focusing*). Obracając wielkie arkusze papieru, to znaczy dobierając odpowiednie położenie tarczy, zdołaliśmy skierować wiązkę pionów o przyzwoitej energii - około 60 MeV - prosto w stronę mojej nowotkwej komory mgłowej. Jedyny problem stanowiła betonowa ściana, która oddzielała maszynę od laboratorium, gdzie stała moja wspaniała komora.

Nikt się nie spodziewał tego odkrycia. W poniedziałek rano rozłożyliśmy się pod gabinetem dyrektora, by jak najwcześniej przekazać mu nowinę. Mieliśmy do niego trzy niewielkie prośby: (1) zmienić lokalizację tarczy w maszynie; (2) zrobić znacznie cieńsze okienko między komorą próżniową cyklotronu a światem zewnętrznym, aby zminimalizować wpływ, jaki mogła mieć stalowa płyta grubości 2,5 metra na pojawiające się piony; (3) wybić nowy otwór - wysoki na 10 cm i szeroki na 25 cm - w betonowej ścianie grubości trzech metrów. A wszystkiego tego domagali się skromny doktorant i młody asystent!

Nasz dyrektor, profesor Eugene Booth, był prawdziwym dżentelmenem z Georgii, któremu bardzo rzadko się zdarzało, by powiedział choćby „do licha”. Ale dla nas zrobił wyjątek! Perswadowaliśmy mu, tłumaczyliśmy i schlebialiśmy. Malowaliśmy przed nim

wizje pełnej chwały przyszłości. Mamiłiśmy go sławą! Wyobraź sobie tylko: pierwsza w świecie zewnętrzna wiązka pionów!

Booth wyrzucił nas za drzwi, ale po *lunchu* wezwał z powrotem (tymczasem my rozważaliśmy, czy lepiej będzie zażyć strychninę czy arszenik). Odwiedził go Bernardini, któremu przedstawił naszą koncepcję. Przypuszczam, że Bernardiniemu umknęły szczegóły naszej propozycji wyłożone w południowej, śpiewnej angielszczyźnie Bootha. On sam wyznał mi kiedyś: „Boos, Booz, któż potrafi wymówić te wszystkie amerykańskie nazwiska?” Niemniej udzielił nam swego poparcia z typowym dla siebie włoskim entuzjazmem.

Miesiąc później wszystko już działało - tak jak to wyrysowaliśmy na papierze pakowym. W ciągu kilku dni moja komora mgłowa zarejestrowała więcej pionów niż wszystkie inne laboratoria świata razem wzięte. Na każdej fotografii (robiliśmy je co minutę) było 6-10 pięknych śladów pionów. Na co trzeciej lub co czwartej fotografii widniało zatłamanie śladu pionu, ukazujące jego rozpad na mion i coś innego”. Moja rozprawa doktorska dotyczyła rozpadu pionów. W ciągu sześciu miesięcy stworzyliśmy cztery wiązki. Nevis pracował pełną parą, produkując dane, dzięki którym określiliśmy własności pionów. Gdy tylko nadarzyła się sposobność, pojechaliśmy z Johnem do Saratogi na wyścigi konne. Tam John postawił w ósmej gonitwie wszystkie nasze pieniądze - przeznaczone na obiad i benzynę na powrotną drogę. Szczęście nieustannie mu dopisywało. Wygrał 28 do 1. Naprawdę uwielbiałem tego faceta.

John Tinlot musiał mieć niesamowitą intuicję, by podejrzewać zjawisko ogniskowania na obrzeżu pola, które przegapili wszyscy inni pracujący z cyklotronami. Został wybitnym profesorem Uniwersytetu w Rochester, lecz, niestety, zmarł na raka w wieku 43 lat.

Dygresja w stronę nauk społecznych: pochodzenie wielkiej nauki

Druga wojna światowa stanowiła punkt zwrotny, dzielący przedwojenny styl badawczy od powojennego. (Ale mi się udało kontrowersyjne stwierdzenie, co?) Wyznaczyła także początek nowej fazy w poszukiwaniach a-tomu. Możemy wymienić kilka czynników, które do tego doprowadziły. Wojna spowodowała wielki skok w rozwoju techniki. Dokołał się on głównie w Stanach Zjednoczonych, które nie doświadczyły niszczących skutków działań wojennych. Konstrukcja radaru, rozwój elektroniki, budowa bomby jądrowej to przykłady tego, co może zrodzić się ze współpracy nauki z inżynierią. (Pod warunkiem, że dysponują nieograniczonym budżetem).

Vannevar Bush, naukowiec odpowiedzialny za politykę naukową w Stanach Zjednoczonych, określił nowe związki między nauką a rządem w raporcie przedstawionym prezydentowi Franklinowi D. Rooseveltowi. Od tego czasu rząd Stanów Zjednoczonych zobowiązywał się łożyć na badania podstawowe w rozmaitych dziedzinach nauki. Kwoty wydawane na badania i na nauki stosowane rosły tak szybko, że teraz suma 1000 dolarów, którą Lawrence po wielkich trudach otrzymał na początku lat czterdziestych, wydaje się śmieszna. Nawet po uwzględnieniu inflacji kwota ta błędnie w porównaniu z federalnymi wydatkami na badania podstawowe w roku 1990: około 12 miliardów dolarów. Druga wojna światowa spowodowała też wielki napływ uciekinierów - uczonych, którzy walnie przyczynili się do gwałtownego rozkwitu nauki w USA.

Na początku lat pięćdziesiątych akceleratory zdolne do prowadzenia badań w dziedzinie fizyki jądrowej na najwyższym poziomie miało około dwudziestu uniwersytetów. W miarę jak coraz lepiej rozumieliśmy jądro, linia frontu przesuwała się w głąb, w obszary subjądrowe; do ich badania potrzebne były coraz większe i coraz kosztowniejsze urządzenia. Nadeszła era konsolidacji - łączenia kapitałów i sił. Dziewięć uniwersytetów połączyło swe fundusze i wysiłki, by zbudować i zarządzać akceleratorem w Brookhaven na Long Island. Od 1952 roku korzystali z urządzenia o mocy 3 GeV, a od 1960 - o mocy 30 GeV. Uniwersytet w Princeton i Uniwersytet Stanu Pensylwania porozumiały się celem skonstruowania maszyny protonowej w pobliżu Princeton. MIT i Harvard zbudowały razem akcelerator elektronowy w Cambridge - urządzenie przyspieszające elektrony do 6 GeV.

Z biegiem lat, gdy konsorcja rosły w siłę, zmniejszała się liczba maszyn zdolnych do prowadzenia badań „na linii frontu”. Potrzebowaliśmy coraz większych energii, aby odpowiedzieć na pytanie: co jest w środku? - i aby kontynuować poszukiwania prawdziwego a-tomu, czyli zera i jedyńki z naszej bibliotecznej metafory. Budowa nowych maszyn powodowała likwidację starych, żeby inaczej wykorzystać uwięzione w nich fundusze, i tak Wielka Nauka (termin często używany w pejoratywnym znaczeniu przez nie doinformowanych publicystów) stawała się coraz większa. W latach pięćdziesiątych przeprowadzało się być może dwa lub trzy eksperymenty w zespołach dwu- a najwyżej czteroosobowych. W następnych dziesięcioleciach zespoły stawały się coraz liczniejsze, a eksperymenty zajmowały coraz więcej czasu, częściowo z powodu konieczności budowania coraz bardziej skomplikowanych detektorów. W roku 1990 w samym tylko zespole detektorowym (CDF) w Fermilabie pracowało 360 uczonych i studentów z 12 uniwersytetów, dwóch laboratoriów państwowych i instytutów z Włoch i Japonii. Okres trwania eksperymentu rozciągnął się do całego roku - lub jeszcze dłuższego czasu - nieprzerwanego (wyjąwszy Boże Narodzenie, Święto Niepodległości i awarie) zbierania danych.

Rząd Stanów Zjednoczonych nadzorował tę ewolucję od nauki kieszonkowej do nauki wykorzystującej akceleratory o rozmiarach setek i tysięcy metrów. Wojenny program badawczy, którego celem było skonstruowanie bomby atomowej, dał początek istnieniu Komisji Energii Atomowej (Atomic Energy Commission - AEC), cywilnej agencji nadzorującej badania nad bronią jądrową, jej produkcję i przechowywanie. Jako państwowemu trustowi, agencji powierzono również misję utrzymywania i nadzorowania podstawowych badań w fizyce jądrowej, która później przerodziła się w fizykę cząstek elementarnych.

Demokrytejski a-tom zawędrował nawet w progi sal Kongresu, który powołał wspólny (parlamentu i senatu) Komitet Energii Atomowej dla sprawowania nadzoru nad badaniami. Przesłuchania prowadzone przez ten komitet, publikowane w gęsto zadrukowanych zielonych księgach rządowych, będą kiedyś stanowiły nieocenione źródło informacji dla historyków nauki. Można tam znaleźć świadectwa, jakie składali E. O. Lawrence, Robert Wilson, I. I. Rabi, J. Robert Oppenheimer, Hans Bethe, Enrico Fermi, Murray Gell-Mann i wielu innych, którzy cierpliwie odpowiadali na pytania dotyczące przebiegu poszukiwań ostatecznej cząstki i dlaczego jest im potrzebna jeszcze jedna maszyna. Wymiana zdań między wspaniałym budowniczym i dyrektorem Fermilabu Robertem Wilsonem a senatorem Johnem Pastore'em, przytoczona na wstępie niniejszego rozdziału, pochodzi z jednej z tych zielonych ksiąg.

By dokończyć tę wyliczankę, wypada dodać, że AEC przekształciła się w ERDA (Energy Research and Development Agency, czyli Agencję Badań Jądrowych), ta zaś wkrótce ustąpiła miejsca DOE (Department of Energy, czyli Departamentowi Energii), który w obecnej chwili nadzoruje państwowe laboratoria prowadzące badania za pomocą akceleratorów. Obecnie w Stanach istnieje pięć takich placówek zajmujących się fizyką wysokich energii. Są to: SLAC, Brookhaven, Cornell, Fermilab oraz SSC (w budowie).

Laboratoria z akceleratorami z reguły należą do rządu, ale zarządzają nimi na mocy kontraktu różne uniwersytety - jak to jest w wypadku SLAC - albo konsorcja uniwersytetów czy instytucji (przykład Fermilabu). Zarząd zatrudnia dyrektora, a potem się modli. Dyrektor kieruje pracami laboratorium, podejmuje wszystkie ważne decyzje i zbyt długo sprawuje swoją ważną funkcję. Gdy w latach 1979-1989 piastowałem funkcję dyrektora Fermilabu, moim głównym zadaniem było wcielanie w życie wizji R. R. Wilsona: budowa tawatronu, pierwszego nadprzewodzącego akceleratora. Musieliśmy także stworzyć akcelerator protonów i antyprotonów oraz monstrualne detektory zdolne do rejestrowania efektów zderzeń zachodzących przy energiach bliskich 2 TeV.

Jako dyrektor Fermilabu, bardzo martwiłem się zmianami, które zaszły w stylu prowadzenia prac badawczych. W jaki sposób studenci i młodzi doktorzy mają doświadczać radości poznania i tworzenia, będącej udziałem uczniów Rutherforda, twórców teorii kwantowej, czy mojej własnej małej grupki kolegów wspólnie pracującej nad różnymi problemami na podłodze gdzieś w czeluściach cyklotronu Nevis? Ale im dłużej przypatrywałem się temu, co się dzieje w laboratorium, tym spokojniejszy się stawałem. Gdy odwiedzałem CDF w środku nocy (także wtedy, gdy nie było tam starego Demokryta), spotykałem ogromnie przejętych studentów nadzorujących swe eksperymenty. Na wielkim ekranie rozświetlały się zderzenia interpretowane przez komputer na użytek 10-12 fizyków czuwających na nocnej zmianie. Od czasu do czasu na ekranie ukazywało się coś tak intrygującego i tak wyraźnie wskazującego na to, że gdzieś w trzewiach akceleratora zachodzą procesy należące do „nowej fizyki”, iż rozlegał się zbiorowy jęk zachwytu.

Każdy wielki program badawczy wymaga współpracy wielu grup liczących od pięciu do dziesięciu osób: jednego lub dwóch profesorów, kilku asystentów i kilku doktorantów. Profesor opiekuje się swoją trzódką, pilnuje, by nie zagubili się w tłumie. Od początku każdy członek grupy bierze udział w planowaniu, budowaniu oraz testowaniu aparatury. Później dochodzi analiza danych. Każdy z eksperymentów dostarcza tak wielkiej liczby danych, że wiele z nich musi długo czekać na interpretację. Poszczególne młodzi adepci nauki pod okiem profesora wybierają sobie konkretne problemy, które zyskały aprobatę rady naukowej. A problemów jest pod dostatkiem. Na przykład: jak przebiega proces powstawania cząstek W^- i W^+ w trakcie zderzeń protonów z antyprotonami? Ile energii unoszą one ze sobą? Pod jakimi kątami są emitowane? I tak dalej. Rozwiązanie może być interesującym szczegółem albo wskazówką dotyczącą jakiegoś kluczowego mechanizmu, w którym bierze udział silne lub słabe oddziaływanie. Najbardziej intrygującym zadaniem czekającym nas w latach dziewięćdziesiątych jest znalezienie kwarka t^1 i analiza jego własności. W roku 1992 poszukiwania te były prowadzone przez cztery niezależne grupy pracujące w CDF.

¹ Istnienie kwarka t zostało ostatecznie potwierdzone w Fermilabie na przełomie 1994 i 1995 roku (przytłum.).

Tu młodzi fizycy zostają rzućeni na głęboką wodę, zmagają się ze skomplikowanymi programami komputerowymi i nieuniknionymi zniekształceniami, powstałymi na skutek niedoskonałości aparatury. Ich zadanie polega na wyciąganiu prawidłowych wniosków na temat praw przyrody, na ułożeniu kolejnego kawałka mozaiki - naszego obrazu mikroświata. Udziela im wsparcia cały zespół: eksperci od oprogramowania, od analiz teoretycznych i mistrzowie w dziedzinie poszukiwania danych potwierdzających robocze hipotezy. Jeśli znaleźli jakiś interesujący szczegół w śladzie pozostawionym przez cząstkę W opuszczającą rejon zderzenia, muszą rozstrzygnąć, czy jest on artefaktem spowodowanym przez aparaturę (ujmując rzecz metaforycznie: czy pojawił się na skutek małej rysy na soczewce mikroskopu?) lub wadliwie działający program komputerowy. A może ten szczegół jest prawdziwy? Jeśli tak, to czy kolega Henry nie powinien zauważyć podobnego efektu w swoich analizach dotyczących cząstki Z, a koleżanka Marjorie podczas analiz śladów odrzutu?

Wielka Nauka zagościła na stałe nie tylko w dziedzinie fizyki cząstek elementarnych. Astronomowie dzielą się wielkimi teleskopami, porównują swoje obserwacje, by wyciągać prawidłowe wnioski dotyczące całego kosmosu. Oceanografowie wspólnie korzystają ze statków badawczych wyposażonych w wyrafinowane sonary, przyrządy do nurkowania oraz specjalne aparaty fotograficzne i kamery. Prace nad rozwiązaniem kodu genetycznego są w dziedzinie mikrobiologii odpowiednikiem naszej Wielkiej Nauki. Nawet chemicy potrzebują spektrometrów masowych, kosztownych laserów barwnikowych i ogromnych komputerów. Nieuchronnie niemal we wszystkich dziedzinach uczeni zaczynają wspólnie korzystać z kosztownych urządzeń niezbędnych dla dalszego rozwoju nauki.

Powiedziawszy to wszystko, muszę podkreślić, że jest niezmiernie ważne, by młodzi adepci nauki mogli także pracować w bardziej tradycyjnym systemie, skupieni wokół niewielkiego projektu, w niewielkiej grupie i pod opieką profesora. To daje im wspaniałą możliwość, by samemu nacisnąć guzik, zgasić światło i pójść do domu pomyśleć, a może nawet spać. Mała Nauka także dokonywała odkryć i wprowadzała innowacje, które w nieoceniony sposób przyczyniły się do rozwoju wiedzy. Musimy dążyć do osiągnięcia odpowiedniej równowagi w naszej polityce wobec nauki i z wielką wdzięcznością przyjmować istnienie obu opcji. Naukowcy zajmujący się fizyką wysokich energii dziś mogą już jednak tylko narzekać i z nostalgią wspominać dawne, dobre czasy, kiedy samotny uczony siedział w zagraconym laboratorium i mieszał barwne eliksiry. To czarująca wizja, ale nigdy nie doprowadzi nas do Boskiej Cząstki

Z powrotem do maszyn: trzy przełomy technologiczne

Spośród wielu przełomów technologicznych, które pozwoliły przyspieszać cząstki w zasadzie do nieograniczonych energii (jeśli nie liczyć ograniczeń nakładanych przez budżet), trzy zasługują na dokładniejsze omówienie.

Pierwszy z nich wiąże się z odkryciem zasady stabilności fazowej przez radzieckiego geniusza Władimira J. Wekslera oraz, niezależnie, przez Edwina McMillana, fizyka z Berkeley. Nasz wszędobylski norweski inżynier Rolf Wideröe niezależnie opatentował ten sam pomysł. Stabilność fazowa jest na tyle istotna, że chyba usprawiedliwiona będzie kolejna metafora. Wyobraź sobie, drogi Czytelniku, dwie półkoliste miseczki o ma-

leńskich płaskich denkach. Obróć jedną z nich do góry dnem i połóż małą kulkę na płaskiej części, która teraz jest wieczkiem. Połóż drugą kulkę na dnie nie odwróconej miski. Obie kulki znajdują się w stanie spoczynku. Ale czy w obu wypadkach jest to stan stabilny? Nie. By się o tym przekonać, trąć lekko każdą z nich. Kulka numer 1 stoczy się po miseczce i jej stan ulegnie radykalnej zmianie. Była niestabilna. Kulka numer 2 wstoczy się trochę w górę po ściance miseczki, wróci na dno, wespnie się po drugiej stronie i tak będzie oscylowała wokół położenia równowagi. To jest stabilność.

Obliczenia matematyczne opisujące zachowanie cząstek w akceleratorze mają wiele wspólnego z opisem tych dwóch stanów. Jeśli niewielkie zaburzenie - na przykład nieznaczne zderzenia cząstki z atomem gazu, który pozostał w komorze akceleratora, albo z inną przyspieszaną cząstką - prowadzi do znacznej zmiany ruchu, to nie ma w tym wypadku podstawowej stabilności i cząstka ta prędzej czy później nam przepadnie. Z drugiej strony, jeśli podobne drobne zaburzenia doprowadzają jedynie do niewielkich oscylacyjnych odchyłeń od idealnego toru, mamy układ stabilny.

Postęp w projektowaniu akceleratorów dokonywał się w wyniku subtelnego współdziałania rozważań analitycznych (teraz w wysokim stopniu skomputeryzowanych) z nowymi wynalazkami: pomysłowymi urządzeniami, w których konstrukcji często wykorzystywano osiągnięcia techniki radarowej z okresu wojennego. Zasadę stabilności fazowej zastosowano w wielu urządzeniach poprzez użycie sił elektrycznych o częstościach radiowych. Stabilność fazowa w akceleratorze zostaje osiągnięta wtedy, gdy tak uregulujemy częstość przyspieszających zmian napięcia, aby cząstka pojawiała się w szczelinie w nieco nieodpowiednim momencie, dzięki czemu uzyskamy niewielką zmianę jej toru. Gdy cząstka pojawi się przy szczelinie następnym razem, błąd zostanie skorygowany. Już wcześniej, gdy omawiałem zasadę działania synchrotronu, podałem przykład zastosowania tej zasady. W rzeczywistości zjawisko to polega na tym, że błąd jest nadmiernie korygowany i cząstka oscyluje wokół idealnej fazy, w której osiągnane jest odpowiednie przyspieszenie. Tak jak kulka na dnie miseczki.

Kolejny przełom nastąpił w roku 1952, kiedy w Brookhaven ukończono budowę Cosmotronu - akceleratora o mocy 3 GeV. Grupa pracujących przy akceleratorze fizyków oczekiwała wizyty kolegów z CERN w Genewie, gdzie projektowano urządzenie o mocy 10 GeV. W trakcie przygotowań do spotkania trzech fizycy dokonali ważnego odkrycia. Stanley Livingston (uczeń Lawrence'a), Ernest Courant i Hartland Snyder byli przedstawicielami nowego gatunku fizyków: teoretyków od akceleratorów. Natknęli się na zjawisko, zwane silnym ogniskowaniem. Zanim opowiem szczegółowo o drugim przełomie, pragnę podkreślić, że zagadnienia dotyczące akceleratorów stały się wyrafinowaną i nadzwyczaj zawilgą dziedziną wiedzy. Warto powtórzyć kilka podstawowych faktów. Mamy więc szczelinę, w której pole elektryczne zmienia się z częstością radiową, dzięki czemu mijające ją za każdym razem cząstki zyskują pewną porcję energii. Żeby wielokrotnie korzystać ze szczeliny, za pomocą magnesów utrzymujemy cząstkę na mniej więcej kołowej orbicie. Maksymalna energia, jaką cząstka może uzyskać w akceleratorze, zależy od dwóch czynników: największego promienia orbity, na jaki pozwala magnes, oraz największego natężenia pola magnetycznego dopuszczalnego przy tym promieniu. Możemy zwiększać energię osiąganą w nowych maszynach albo zwiększając ich promień, albo podwyższając maksymalną moc pola magnetycznego; albo robiąc obie te rzeczy jednocześnie.

Gdy te dwa parametry są już ustalone, nadanie cząstce zbyt wielkiej energii spowoduje, że wypadnie ona poza strefę oddziaływania magnesów. W roku 1952 cyklotrony nie

mogły przyspieszać cząstek do energii wyższych niż 1000 MeV. Synchronotry utrzymują cząstki na orbicie o stałym promieniu dzięki zmiennemu polu magnetycznemu. Natężenie pola magnetycznego w synchronotronie na początku procesu przyspieszania jest niewielkie (takie, jakiego wymagają niewielkie energie wprowadzanych doń cząstek) i stopniowo wzrasta do maksymalnej wartości. Synchronotron ma kształt obwarzanka, którego promień w różnych maszynach budowanych w latach pięćdziesiątych wynosił 3-16 metrów. Pozwalały one na przyspieszanie cząstek do 10 GeV.

Problem, któremu poświęcili się pomysłowi teoretycy, dotyczył tego, jak utrzymać cząstki w zwartej i stabilnej wiązce jak najbardziej przypominającej idealną cząstkę poruszającą się bez zaburzeń w doskonale jednorodnym polu magnetycznym. Ponieważ cząstki przebywają bardzo długą drogę, nawet najmniejsze zaburzenia i niedoskonałości pola magnetycznego mogą wytrącać je z idealnej orbity. Po jakimś czasie może się okazać, że nie mamy już żadnej wiązki. Dlatego też trzeba stworzyć warunki dla stabilnego przyspieszania. Obliczenia związane z tym zagadnieniem były tak skomplikowane - jak zauważył pewien żartowniś - „że aż brwi się rabinowi poskręcały”.

Silne ogniskowanie polega na takim ukształtowaniu pól magnetycznych sterujących cząstkami, aby utrzymywały je znacznie bliżej idealnej orbity. Sedno pomysłu tkwi w tym, żeby poszczególnym biegunom nadać odpowiedni, lekko zaokrąglony kształt. Dzięki temu siły magnetyczne działające na cząstki wprawiają je w szybki ruch oscylacyjny o maciupieńkiej amplitudzie wokół idealnej orbity. W ten sposób osiągamy stabilność. Przed wprowadzeniem silnego ogniskowania obwarzankowate komory próżniowe musiały mieć 50-100 cm szerokości i wymagały magnesów o podobnej wielkości. Przełom zapoczątkowany w Brookhaven doprowadził do zredukowania rozmiarów komory próżniowej do 7,5-12,5 cm. Rezultat? Bardzo znaczne zmniejszenie kosztu akceleratora w przeliczeniu na jednostkę osiąganą energii.

Silne ogniskowanie zmieniło koszty i bardzo szybko uświadomiło, że możliwa jest budowa synchronotry o promieniu około 60 m. Później pomówimy o drugim parametrze: o natężeniu pola magnetycznego. Dopóki do wyrobu magnesów używa się żelaza, natężenie pola ograniczone jest do dwóch tesli - tyle żelazo może wytrzymać i nie zsinieć z wysiłku. Przełom jest właściwym słowem na określenie silnego ogniskowania i jego konsekwencji. Po raz pierwszy zastosowano je w urządzeniu przyspieszającym elektrony do energii 1 GeV, zbudowanym przez Roberta Wilsona w Cornell. Podobno projekt, który złożyła grupa z Brookhaven w sprawie budowy nowego urządzenia przyspieszającego protony, miał postać dwustronicowego listu! (Można w tym miejscu zacząć biadać nad rozrostem biurokracji, ale to się na nic nie zda). Projekt ten został zatwierdzony i w efekcie w 1960 roku w Brookhaven powstała maszyna o mocy 30 GeV, znana jako AGS. CERN porzucił swoje pierwotne plany budowy urządzenia starego typu o mocy 10 GeV i przy użyciu nowej techniki silnego ogniskowania skonstruował - za tę samą cenę - akcelerator o mocy 25 GeV. Zaczął on działać w roku 1959.

Pod koniec lat sześćdziesiątych zaprzestano stosowania powykrzywianych magnesów i zamiast nich wprowadzono różne magnesy, spełniające oddzielne funkcje. Instaluje się „zwykły” dipol, który utrzymuje cząstkę na orbicie, a funkcję silnego ogniskowania powierza się magnesowi kwadrupolowemu o biegunach symetrycznie rozmieszczonych wokół komory próżniowej.

Wykorzystując obliczenia matematyczne, fizycy nauczyli się, w jaki sposób do kierowania i skupiania cząstek w wiązki można stosować złożone magnesy o rozmaitych kształtach. Magnesy o większej liczbie biegunów - sekstapole, oktapole i dekapole -

stały się składnikami wyrafinowanych układów akceleratorowych tak zaprojektowanych, aby umożliwić jak najprecyzyjniejszą kontrolę orbit cząstek. Począwszy od lat sześćdziesiątych w funkcjonowaniu akceleratorów coraz większą rolę odgrywały komputery. Kontrolowały napięcia, natężenia, ciśnienia i temperatury we wnętrzu maszyny. To właśnie silne ogniskowanie i komputeryzacja umożliwiły zbudowanie niezwykłych maszyn, które powstały w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych.

Pierwsze urządzenie pozwalające na osiągnięcie poziomu GeV (miliarda eV) nosiło skromne imię Cosmotron i zaczęło pracować w Brookhaven w 1952 roku. Następnym był akcelerator o mocy 1,2 GeV należący do Uniwersytetu Cornell. A oto inne gwiazdy tej epoki:

AKCELERATOR	ENERGIA	MIEJSCE	ROK
bewatron	6 GeV	Berkeley	1954
AGS	30 GeV	Brookhaven	1960
ZGS	12,5 GeV	Argonne (Chicago)	1964
„dwusetka”	200 GeV	Fermilab	1972
	(rozbudowany do 400 GeV w 1974		
tewatron	900 GeV	Fermilab	1983

Poza Stanami Zjednoczonymi znajdowały się: Saturne (Francja, 3 GeV), Nimrod (Anglia, 10 GeV), Dubna (ZSRR, 10 GeV), KEK PS (Japonia, 13 GeV), PS (CERN/Genewa, 25 GeV), Sierpuchów (ZSRR, 70 GeV), SPS (CERN/Genewa, 400 GeV).

Trzecim przełomem było wprowadzenie przyspieszania kaskadowego. Na pomysł ten wpadł fizyk z Caltech, Matt Sands. Stwierdził on, że doprowadzanie cząstki do wysokiej energii w jednej tylko maszynie jest nieefektywne. Zaproponował korzystanie z oddzielnych akceleratorów, z których każdy w optymalny sposób przyspiesza cząstki do pewnej energii, na przykład od 0 do 1 MeV, od 1 do 100 MeV itd. Kolejne etapy można by porównać do zmian biegów w samochodzie wyścigowym. Każdy z nich ma za zadanie jak najefektywniej zwiększyć prędkość. W miarę wzrastania energii wiązka staje się coraz bardziej zwarta. Na wyższych stadiach coraz mniejsza powierzchnia przekroju wiązki wymaga coraz mniejszych, a więc tańszych magnesów. Kaskadowe przyspieszanie zdominowało wszystkie nowe maszyny od lat sześćdziesiątych. Najwspanialszymi przykładami zastosowań tego rozwiązania są: tewatron (5 etapów) i obecnie budowany SSC (6 etapów).

Czy większe jest lepsze?

W powyższych rozważaniach nad szczegółami rozwiązań mógł nam umknąć pewien detal. A mianowicie: dlaczego w ogóle dobrze jest budować duże cyklotrony i synchrotrony? Wideröe i Lawrence wykazali, że pionierzy się mylili i nie ma potrzeby wytwarzać wielkich napięć, aby przyspieszać cząstki do wysokich energii. Należy tylko przepuścić cząstki przez serię szczelin albo posłać je na kołową orbitę, tak aby wielokrotnie mijały jedną szczelinę. Dlatego właśnie najistotniejszymi parametrami charakteryzującymi kołowe urządzenia są: siła magnesu i promień orbity. Budowniczowie akceleratorów tak manipulują tymi parametrami, aby otrzymać pożądaną energię. Wielkość promienia jest ograniczona głównie przez finanse przeznaczone na budowę. Natomiast siłę

magnesu ogranicza dostępna technologia. Jeśli nie możemy zwiększyć natężenia pola magnetycznego, to chcąc otrzymać więcej energii, musimy zwiększyć okrąg. W wypadku SSC wiemy, że chcemy otrzymać wiązki o energii 20 TeV. Wiemy też (albo nam się wydaje, że wiemy), jaką moc mogą mieć nasze magnesy. W ten sposób oceniamy, że nasza orbita powinna mieć długość 85 km.

Czwarty przełom: nadprzewodnictwo

Jeszcze w 1911 roku pewien fizyk holenderski odkrył, że niektóre metale schłodzone do bardzo niskich temperatur - zaledwie parę stopni powyżej zera absolutnego (-273°C) - tracą oporność elektryczną. W pętli przewodu o takiej temperaturze prąd płynąłby w nieskończoność, bez żadnych strat, bez konieczności doprowadzania energii.

Do twojego domu, drogi Czytelniku, energia elektryczna doprowadzana jest z elektronów za pośrednictwem miedzianych przewodów. Przewody te nagrzewają się z powodu oporu, jaki stawiają płynącemu prądowi. Pewną ilość energii zużywa się na wytworzenie tego niepotrzebnego ciepła, powiększającego rachunek, który musisz zapłacić za elektryczność. W konwencjonalnych elektromagnesach stosowanych w generatorach, silnikach i akceleratorach prąd wytwarzający pole magnetyczne płynie w miedzianych przewodach. W silniku pole magnetyczne obraca zwoje drutu przewodzącego prąd. Można wyczuć ciepło będące produktem ubocznym tego procesu. Przewody elektromagnesów rozgrzewają się i trzeba je chłodzić silnym strumieniem wody, która zazwyczaj płynie przez otwory w grubej warstwie miedzianego uzwojenia. To właśnie chłodzenie elektromagnesów pożera lwią część pobieranego przez akcelerator prądu. Na przykład w 1972 roku rachunek za elektryczność w Fermilabie wyniósł blisko 15 milionów dolarów, z czego prawie 90 procent przypadało na energię potrzebną do utrzymania przy pracy elektromagnesów głównego pierścienia (400 GeV).

Na początku lat sześćdziesiątych doszło do kolejnego przełomu technologicznego. Okazało się, że w nowych stopach egzotycznych metali nawet podczas przepływu wielkich prądów wytwarzających bardzo silne pola magnetyczne utrzymuje się delikatny stan nadprzewodnictwa. A wszystko to dzieje się w całkiem przyzwoitej temperaturze 5-10 K, a nie w bardzo trudnym do utrzymania zakresie 1-2 K, którego wymagały zwykłe metale. W temperaturze 5 K hel jest cieczą (wszystkie inne pierwiastki są zestalone), toteż pojawiła się możliwość praktycznego zastosowania nadprzewodnictwa. Większość dużych laboratoriów zaczęła prace z przewodami zanurzonymi w ciekłym helu, wykonanymi z takich stopów, jak niob-tytan czy niob 3-cyna, a nie tradycyjnej miedzi.

Wykorzystując nowe stopy, zbudowano nowe, wielkie magnesy potrzebne detektorom cząstek - na przykład otaczające komorę pęcherzykową - ale nie w samych akceleratorach, ponieważ tu pole magnetyczne musi rosnać, w miarę jak cząstki nabierają energii. Zmieniający się w magnesie prąd powoduje pojawienie się efektów podobnych do tarcia (prądów wirowych), które niszczą stan nadprzewodnictwa. W latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych poświęcono temu problemowi wiele badań, w czym przodował Fermilab pod kierownictwem Wilsona. Jego zespół podjął prace nad magnesami nadprzewodzącymi w roku 1973, wkrótce po tym, jak zaczął działać akcelerator, zwany dwusetką. Jednym z motywów podjęcia tych badań był gwałtowny wzrost kosztów energii elektrycznej, spowodowany przez kryzys naftowy tamtych czasów. Inny po-

wód to rywalizacja z Europejskim Ośrodkiem Badań Jądrowych z siedzibą w Genewie (CERN).

Pod względem finansowym lata siedemdziesiąte były latami chudymi dla nauki w Stanach Zjednoczonych. Po drugiej wojnie światowej Stany niezaprzeczalnie objęły przodownictwo w wielu dziedzinach nauki, ponieważ reszta świata trudziła się nad odbudową ze zniszczeń wojennych gospodarki i infrastruktury. Dopiero pod koniec lat siedemdziesiątych zaczął powracać stan równowagi. W Europie budowano maszynę o mocy 400 GeV - supersynchrotron protonowy (Super Proton Synchrotron, czyli SPS) - dysponując większymi funduszami i lepszymi (bardzo kosztownymi) detektorami, od których w głównej mierze zależy jakość otrzymywanych rezultatów. (To urządzenie wyznaczało początek nowej ery we współpracy międzynarodowej, a także we współzawodnictwie. W latach dziewięćdziesiątych Europa i Japonia wyprzedzają już Stany Zjednoczone w niektórych dziedzinach badań, a w innych są tylko nieznacznie w tyle).

Koncepcja Wilsona polegała na tym, że gdyby udało się rozwikłać problem związany ze zmianami pola magnetycznego, to nadprzewodzący pierścień pozwoliłby zaoszczędzić mnóstwo energii elektrycznej, dając jednocześnie silniejsze pole magnetyczne, co w wypadku urządzenia o określonym promieniu oznaczałoby osiągnięcie wyższych energii. Przy pomocy profesora Alvina Tollestrupa z Caltech, okresowo współpracującego z Fermilabem (w końcu zatrudnił się tam na stałe), Wilson zajął się bardzo szczegółowym badaniem tego, jak zmienne prądy i pola powodują lokalne podwyższenie temperatury w ośrodku nadprzewodzącym. Wykorzystując wyniki badań własnych oraz prowadzonych w innych laboratoriach, szczególnie w Laboratorium im. Rutherforda w Anglii, zbudowano w Fermilabie setki modeli. Nawiązano współpracę z metalurgami i ze specjalistami od inżynierii materiałowej i w latach 1973-1977 zdołano rozwiązać problem. Można było podnieść natężenie prądu w modelowych elektromagnesach od 0 do 5000 amperów w ciągu dziesięciu sekund, nie niszcząc przy tym stanu nadprzewodnictwa. Na przełomie lat 1978/1979 ruszyła linia produkcyjna siedmiometrowych magnesów o doskonałych własnościach, a w roku 1983 zaczął działać tawatron - nadprzewodzący „dopalacz” w kompleksie Fermilabu. Maksymalna osiągalna energia wzrosła dzięki temu z 400 do 900 GeV, a zużycie energii spadło z 60 do 20 megawatów. Większość potrzebnej mocy zużywano na otrzymywanie ciekłego helu.

Gdy Wilson w roku 1973 zaczynał swój program badawczy, roczna produkcja materiałów nadprzewodzących w Stanach Zjednoczonych wynosiła kilkaset kilogramów. Fermilab zużył 56 tysięcy kilogramów takich substancji. Stanowiło to poważny bodziec stymulujący rozwój całej gałęzi przemysłu. Dziś najpoważniejszymi konsumentami materiałów nadprzewodzących są firmy produkujące medyczne urządzenia diagnostyczne, które wykorzystują zjawisko rezonansu magnetycznego. Chyba można przypisać Fermilabowi odrobinę zasług za rozwój tej gałęzi przemysłu, która dziś osiąga roczne obroty w wysokości 500 milionów dolarów.

Kowboj dyrektorem laboratorium

Człowiekiem, któremu Fermilab zawdzięcza swe istnienie, jest nasz pierwszy dyrektor, artysta, kowboj i konstruktor - Robert Rathbun Wilson. Urodził się w stanie Wyoming, gdzie jeździł konno i uczył się pilnie w szkole; w końcu zdobył stypendium na studia w Berkeley. Tam został uczniem E. O. Lawrence'a.

Opisałem już architektoniczne osiągnięcia tego renesansowego człowieka, ale w dziedzinie techniki Wilson był równie kompetentny. Został dyrektorem Fermilabu w 1967 roku, kiedy przyznano mu 250 milionów dolarów na budowę (jak czytamy w oficjalnej dokumentacji) urządzenia o mocy 200 GeV, dającego siedem wiązek przyspieszonych cząstek. Budowa rozpoczęta w 1968 roku miała trwać 5 lat, ale Wilson ukończył ją przed terminem, w 1972 roku. W roku 1974 urządzenie już pracowało przy energii 400 GeV z czternastoma wiązkami, a z przyznanej kwoty pozostało Wilsonowi jeszcze 10 milionów dolarów reszty.

Przy tym wszystkim kompleks budynków Fermilabu stanowi osiągnięcie architektoniczne najświetniejsze ze wszystkich budowli rządowych. Niedawno obliczyłem, że gdyby Wilson w ciągu ostatnich 15 lat z podobną maestrią zarządzał naszymi wydatkami zbrojeniowymi, Stany Zjednoczone cieszyłyby się elegancką nadwyżką w budżecie, a o naszych czołgach byłoby głośno w świecie sztuki.

Jedna z anegdot głosi, że pomysł zbudowania Fermilabu przyszedł Wilsonowi do głowy po raz pierwszy podczas rocznego pobytu w Paryżu, w roku 1960. Pewnego dnia uczestniczył w publicznej sesji rysunkowej w Grande Chaumière. W centrum kręgu rysowników znajdowała się piękna, krągła modelka pozująca do aktu. W tamtych dniach omawiano plany dotyczące „dwusetki” i Wilson był bardzo niezadowolony z dochodzących doń wieści. Podczas gdy inni rysowali piersi, on szkicował koliste komory próżniowe i ozdabiał je wzorami matematycznymi. To się nazywa poświęcenie!

Wilson nie był doskonały. Podczas budowy Fermilabu wybierał czasem rozwiązania niefortunne. Skarżył się, że jedno z nich kosztowało go rok pracy (zakończyłby budowę w 1971 roku) i 10 milionów dolarów. Dawał się ponieść emocjom. W roku 1978 zirytował się opieszałością federalnych sponsorów i zrezygnował z prowadzenia laboratorium. Gdy zaproponowano mi, bym został jego następcą, poszedłem się z nim zobaczyć. Wilson zagroził, że nie da mi spokoju, jeśli się nie zgodzę. Więc się zgodziłem. Przeraziła mnie wizja Wilsona ścigającego mnie konno po całym świecie. Przyjąłem posadę i przygotowałem trzy koperty.

Dzień z życia protonu

Wszystko, co zostało powiedziane w tej części, możemy zilustrować opisem kaskadowego akceleratora należącego do Fermilabu. Składa się on z układu pięciu maszyn, a jeśli liczyć także dwa pierścienie, które służą do wytwarzania antymaterii, to z siedmiu. Cały Fermilab stanowi bardzo skomplikowany układ choreograficzny zawierający pięć akceleratorów, z których każdy jest o stopień wyższy od poprzedniego pod względem osiąganych energii i wyrafinowania. Zupełnie tak, jak ontogeneza będąca rekapitulacją filogenezy (czy czegoś tam innego).

Najpierw potrzebujemy czegoś, co można by przyspieszyć. Wstępujemy do sklepu z narzędziami i częściami żelaznymi i kupujemy butlę sprężonego wodoru. Atom wodoru składa się z jednego elektronu i prostego jednoprotonowego jądra. Protonów z tej butli wystarczy nam na rok pracy Fermilabu. Koszt: około 20 dolarów, nie licząc kaucji za bu-

tlę. Pierwszym urządzeniem w kaskadzie jest ni mniej, ni więcej tylko elektrostatyczny akcelerator Cockcrofta-Waltona, projekt z roku 1930. Mimo że jest to najbardziej starożytny ze wszystkich akceleratorów w Fermilabie, wygląda najbardziej futurystycznie. Zdobia go wielkie błyszczące kule oraz obwarzankowate pierścienie, toteż bardzo często bywa fotografowany. W tym urządzeniu iskra odziera atom wodoru z elektronu, pozostawiając nagi proton w zasadzie w stanie spoczynku. Następnie maszyna ta przyspiesza protony do energii 750 keV i kieruje je do drugiego urządzenia - do liniowego akceleratora, zwanego linak, gdzie protony na przestrzeni 160 metrów mijają serię wnęk - szczelin - z polem elektrycznym zmieniającym się z częstością radiową i osiągają energię równą 200 MeV.

Obdarzone tą - godziwą już - energią, protony za pomocą magnetycznego sterowania i ogniskowania przesyłane są do akceleratora wspomaganego - synchrotronu - w którym osiągają energię 8 GeV. I pomyśleć tylko, że już na tym etapie protony dysponują energią wyższą niż uzyskiwana w bewatronie w Berkeley, pierwszym akceleratorze przyspieszającym do energii liczonej w GeV. A przed sobą mamy jeszcze dwa pierścienie. Nasza porcja protonów wędruje teraz do głównego pierścienia - do „dwusetki” o obwodzie równym mniej więcej 6,5 kilometra. W latach 1974-1982 „dwusetka” pracowała na poziomie 400 GeV - dwukrotnie wyższym od tego, dla którego została zaprojektowana. Ten główny pierścień był pociągowym koniem kompleksu Fermilabu.

Po podłączeniu tewatronu w roku 1983 życie „dwusetki” stało się trochę lżejsze. Obecnie doprowadza protony tylko do 150 GeV i przesyła je do nadprzewodzącego pierścienia tewatronu. Obie maszyny mają identyczny promień i leżą jedna nad drugą; tewatron około metra pod „dwusetką”. Normalnie w tewatronie cząstki o energii 150 GeV, prowadzone przez magnesy nadprzewodzące, wykonują 50 tysięcy okrążeń w ciągu sekundy, zyskując za każdym okrążeniem około 700 keV, aż po mniej więcej dwudziestu pięciu sekundach osiągają energię 900 GeV. W tym czasie magnesy zasilane prądem 5000 amperów zwiększyły natężenie pola magnetycznego do 4,1 tesli, czyli ponad dwukrotnie więcej, niż można osiągnąć za pomocą żelaznych magnesów. A energia potrzebna do utrzymania prądu 5000 amperów jest w przybliżeniu równa zeru! Technologia stopów nadprzewodzących wciąż się rozwija. Technologia zastosowana w tewatronie została znacznie ulepszona, tak że w SSC pole magnetyczne będzie miało natężenie równe 6,5 tesli, a CERN prowadzi wytężone badania, by osiągnąć pole sięgające 10 tesli, stanowiące przypuszczalnie nieprzekraczalną granicę dla stopów niobu.

W roku 1987 odkryto nowy rodzaj nadprzewodnictwa, który występuje w materiałach ceramicznych i pojawia się już w temperaturze ciekłego azotu. Odkrycie to wzbudziło wielkie nadzieje na rychły nowy przełom - możliwość stosowania tanich nadprzewodników na masową skalę. Jednak jak dotąd nie opracowano metod otrzymywania silnych pól magnetycznych w tych materiałach i nikt nie potrafi przewidzieć, kiedy zastąpią one stopy niobu i tytanu i czy w ogóle jest to możliwe.

W tewatronie maksymalne pole magnetyczne wynosi 4,1 tesli. Przyspieszone protony zostają wprowadzane przez siły elektromagnetyczne na orbitę prowadzącą je do tunelu, gdzie dzielą się na 14 wiązek. Tu właśnie zespoły eksperymentatorów ustawiają tarcze do bombardowania oraz detektory. Około tysiąca fizyków pracuje nad doświadczeniami z nieruchomymi tarczami. Urządzenie pracuje cyklicznie. Cały proces przyspieszania zajmuje około 30 sekund. Potem wiązka jest „rozciągana” przez następne 20 sekund, aby nie zaciemniać doświadczenia zbyt wielką ilością cząstek naraz. Taka sekwencja powtarza się co minutę.

Wiązka cząstek wychodząca z akceleratora jest bardzo silnie zogniskowana. Przeprowadziliśmy kiedyś pewien eksperyment w Centrum Protonowym, gdzie wiązka wy-dostaje się z akceleratora, jest ogniskowana i nakierowywana na tarczę odległą o 2,5 kilometra. Nasza tarcza miała ćwierć milimetra szerokości - ot, grubość żyłki. Protony uderzają w tę cieką krawędź co minutę, dzień po dniu, przez bardzo wiele tygodni i nigdy nie odchylają się od środka tarczy o więcej niż znikomy ułamek jej szerokości.

Można też zupełnie inaczej wykorzystywać tawatron, a mianowicie do zderzania ze sobą cząstek. To jest zupełnie inny sposób używania tego urządzenia, więc poświęcę mu trochę czasu. Polega to na tym, że cząstki rozpędzone do energii 150 GeV krążą w tawatronie i czekają na antyprotony, które w odpowiednim momencie dostarczane są do tej samej komory i krążą w pierścieniu w przeciwnym kierunku. Gdy obie wiązki znajdują się już w tawatronie, zaczynamy zwiększać moc elektromagnesów i przyspieszamy wszystkie cząstki. (Za chwilę omówię to dokładnie).

W każdej fazie tego procesu komputery kontrolują magnesy i układy częstości radiowej, dbając o to, by protony były skupione w wąską wiązkę i całkowicie pod kontrolą. Czujniki przekazują informację o prądach, napięciach, ciśnieniach, temperaturach, położeniu protonów i najnowszych notowaniach na giełdzie papierów wartościowych. Jakakolwiek usterka mogłaby sprawić, że protony wytrysną z rury próżniowej, wywierciwszy w niej bardzo elegancki i kosztowny otworek. Nie doszło nigdy do czegoś podobnego - przynajmniej na razie.

Decyzje, decyzje: protony czy elektrony

Wiele mówiliśmy o urządzeniach przyspieszających protony, ale cząstki te nie są jedy-nymi kandydatami. Mają jednak tę zaletę, że można je stosunkowo tanio przyspieszać. Potrafimy rozpędzać je do energii tysięcy miliardów elektronowoltów. W SSC będą osiągały 20 bilionów elektronowoltów. Być może nie ma żadnych teoretycznie wyzna-czonych granic naszych możliwości w tej dziedzinie. Z drugiej strony jednak, protony pełne są innych cząstek - składają się z gluonów i kwarków - toteż ich zderzenia są „nieczyste” i skomplikowane. Dlatego niektórzy fizycy wolą przyspieszać elektrony, które są prawdziwymi, punktowymi a-tomami. Zderzenia, w których uczestniczą, są czystsze od protonowych. Ale elektrony mają małą masę, przez co przyspieszanie ich jest trudne i kosztowne: podczas przyspieszania w kołowym akceleratorze emitują ogromne ilości promieniowania elektromagnetycznego i aby nadrobić straty energii, wywołane tym promieniowaniem, trzeba dostarczyć im znacznie więcej energii niż protonom. Z punktu widzenia procesu przyspieszania promieniowanie to trzeba spisać na straty, ale dla wielu uczonych stanowi ono cenny i pożądaný produkt, ponieważ jest bardzo intensywny i ma bardzo małą długość fali. Zadanie wielu kołowych akceleratorów przyspieszających elektrony polega właśnie na produkcji tego promieniowania, zwanego synchrotronowym. Korzystają z niego biolodzy przy badaniach wielkich cząsteczek, producenci układów elektronicznych (ci wykorzystują je do litografii rentgenowskiej), fizycy ciała stałego (do badań nad strukturą materiałów) oraz bardzo wielu innych specjalistów od różnych praktycznych dziedzin.

Jednym ze sposobów uniknięcia tego rodzaju strat energii jest stosowanie akcelera-tora liniowego, takiego jak na przykład ciągnący się przez 3 km linak ze Stanford, zbu-dowany w latach sześćdziesiątych. Pierwotnie nazywano go „M” od monstrum, bo w

tamtym czasie był urządzeniem zupełnie niesamowitym. Zaczyna się na terenie Uniwersytetu Stanforda, mniej więcej 400 metrów od słynnego uskoku tektonicznego św. Andrzeja, i prowadzi w stronę Zatoki San Francisco. SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) zawdzięcza swe istnienie wytrwałości i zapałowi jego założyciela i pierwszego dyrektora - Wolfganga Panofsky'ego. J. Robert Oppenheimer opowiadał mi o tym, jak genialny Panofsky i jego równie genialny brat bliźniak, Hans, studiowali w Princeton. Obaj osiągnęli celujące wyniki, z tym że jeden był o włos lepszy od drugiego. Z tego powodu, według Oppenheimera, nazywano ich Bystry Panofsky i Tępy Panofsky. Który jest którym? „To sekret” - mówi Wolfgang. Prawdę mówiąc, wielu z nas nazywa go po prostu Pief.

Różnice między Fermilabem i SLAC są oczywiste. Jeden przyspiesza protony, drugi elektrony. Jeden jest kolisty, drugi prosty. Gdy mówimy, że liniowy akcelerator jest prosty, to właśnie to mamy na myśli: jest prosty. Przypuśćmy, że zbudowaliśmy trzykilometrowy odcinek drogi. Geodeci mogą nam zagwarantować, że jest prosty, ale w rzeczywistości się mylą: z lekka się zakrzywia, bo leży na zaokrąglonej Ziemi. Dla mierniczego stojącego na powierzchni naszej planety droga ta wygląda jak odcinek linii prostej, ale widziana z przestrzeni kosmicznej jest łukiem. Natomiast rura próżniowa SLAC jest prosta. Gdyby Ziemia miała kształt idealnej kuli, to akcelerator liniowy byłby trzykilometrową styczną do powierzchni Ziemi. Urządzenia przyspieszające elektrony rozprzestrzeniły się po całym świecie, ale SLAC pozostał najbardziej spektakularnym z nich. Przyspieszał elektrony do 20 GeV w roku 1960 i do 50 GeV w roku 1989. Potem na prowadzenie wysunęli się Europejczycy.

Zderzenie czołowe czy tarcza?

No dobrze, więc ustaliliśmy, że dysponujemy następującymi możliwościami wyboru: możemy przyspieszać protony albo elektrony, możemy to robić za pomocą akceleratorów mających kształt okręgu lub linii prostej. Pozostała nam jeszcze jedna decyzja do podjęcia.

Konwencjonalna metoda polega na tym, że protony uwalnia się z objęć pola magnetycznego i transportuje się wiązkę (zawsze w rurach próżniowych) aż do tarczy, z którą się zderza. Wyjaśniałem już, w jaki sposób analiza zderzeń dostarcza informacji o świecie subatomowym. Przyspieszana cząstka wnosi w zderzenie pewną ilość energii, lecz tylko jej ułamek daje się wykorzystać do badań zjawisk zachodzących na bardzo małych odległościach albo do wytwarzania nowych cząstek, w zgodzie z $E = mc^2$.

Prawo zachowania pędu mówi, że część energii biorącej udział w zderzeniu zostanie przekazana jego końcowym produktom. Jeśli na przykład jadący autobus uderzy w stojącą ciężarówkę, to znaczna część energii, jaką dysponował, zostanie zużyta na popchnięcie do przodu różnych kawałków blachy, szkła i gumy. Przez to zmniejsza się ilość energii biorącej udział w gruntowniejszym zniszczeniu ciężarówki.

Jeśli proton o energii 1000 GeV uderza w proton znajdujący się w stanie spoczynku, to zgodnie z nieugiętymi prawami przyrody jakiegokolwiek cząstki powstałe w wyniku tej kolizji muszą w sumie mieć pęd równy pędowi poruszającego się protonu. Okazuje się, że na wytworzenie nowych cząstek pozostaje co najwyżej 42 GeV.

W połowie lat sześćdziesiątych zdaliśmy sobie sprawę, że gdyby można było doprowadzić do czołowego zderzenia dwóch cząstek obdarzonych pełną energią, jaką na-

daje wiązce akcelerator, to w rezultacie dochodziłoby do nieporównanie bardziej gwałtownych kolizji. Brałaby w nich udział podwójna dawka energii, na dodatek dająca się w całości wykorzystać, ponieważ całkowity pęd zderzających się cząstek wynosi zero (ich pędy są równe co do wartości, lecz przeciwnie skierowane). A zatem w akceleratorze o mocy 1000 GeV w czołowym zderzeniu dwóch cząstek uzyskamy 2000 GeV energii na stwarzanie nowych cząstek w porównaniu z 42 GeV w wariacie ze stacjonarną tarczą. Jednak nie jest to takie proste. Łatwo można strzelić z karabinu maszynowego w ścianę, znacznie trudniej jest tak wycelować, by pociski z dwóch karabinów spotkały się w powietrzu. To daje pewne pojęcie o trudnościach związanych ze sterowaniem akceleratorem, w którym wytwarza się przeciwbieżne wiązki.

Wytwarzając antymaterię

Kolejnym akceleratorem wybudowanym w Stanford w 1973 roku było bardzo produktywnie urządzenie, zwane SPEAR (Stanford Positron Electron Accelerator Ring, czyli Pierścieniowy Akcelerator Pozytonowo-Elektronowy w Stanford). W tej maszynie wiązki elektronów przyspiesza się najpierw w trzykilometrowym akceleratorze liniowym do energii 1-2 GeV, a następnie wstrzykuje do niewielkiego pierścienia akumulacyjnego. W wyniku całej serii reakcji powstają pozytony - cząstki Carla Andersona. Najpierw wiązka elektronów oddziałuje z tarczą, by wytworzyć między innymi silną wiązkę fotonów. Różne odłamki w postaci naładowanych cząstek zostają usunięte za pomocą magnesów, które nie oddziałują z neutralnymi fotonami. Czysta wiązka fotonów uderza w cienką tarczę, na przykład platynową. Najczęstszym rezultatem takiego zderzenia jest przekształcenie czystej energii fotonu w parę cząstek: w elektron i pozyton. Energia każdej z tych cząstek równa się połowie energii dającego im początek fotonu, pomniejszonej o masę spoczynkową powstającej pary.

Układ magnesów wyłapuje część pozytonów i wprowadza je do pierścienia akumulacyjnego, gdzie przyspieszone elektrony cierpliwie krążą dookoła. Wiązki elektronów i pozytonów, mające przeciwne ładunki elektryczne, biegną w pierścieniu w przeciwnych kierunkach. Rezultat jest oczywisty: zderzenie czołowe. Dzięki SPEAR dokonano kilku bardzo ważnych odkryć, akceleratory tego typu zaczęły się cieszyć ogromnym powodzeniem i na świat spłynął potok poetyckich (?) akronimów. W kolejności chronologicznej: ADONE (Włochy, 2 GeV), SPEAR (USA, Stanford, 3 GeV), DORIS (Niemcy, 6 GeV), PEP (znowu Stanford, 30 GeV), PETRA (Niemcy, 30 GeV), CESR (USA, Cornell, 8 GeV), VEPP (ZSRR), TRISTAN (Japonia, 60-70 GeV), LEP (CERN, 100 GeV) i SLC (USA, Stanford, 100 GeV). Zauważ, drogi Czytelniku, że akceleratory te są klasyfikowane w zależności od sumy energii dwóch wiązek, na przykład LEP ma 50 GeV w każdej wiązce, a zatem jest urządzeniem osiągającym energię równą 100 GeV.

W roku 1972 stało się możliwe dokonywanie zderzeń między protonami w pionierskim urządzeniu w CERN - w akceleratorze ISR (Intersecting Storage Ring) w Genewie. Tu dwa niezależne pierścienie są ze sobą splecione, a protony krążą w nich w przeciwnych kierunkach i do zderzeń między nimi dochodzi w ośmiu punktach, w których pierścienie przecinają się ze sobą. Materia i antymateria - tak jak elektron i pozyton - może krążyć w tym samym pierścieniu, bo magnesy zmuszają je do ruchu w

przeciwnych kierunkach; ale by zderzać ze sobą protony, potrzebne są dwa osobne pierścienie.

W ISR każdy pierścień wypełniają protony o energii 30 GeV, pochodzące z bardziej konwencjonalnego akceleratora - PS. ISR ostatecznie zaczął odnosić znaczne sukcesy, ale na początku, gdy go uruchomiono w 1972 roku, otrzymywano jedynie kilka tysięcy zderzeń na sekundę w punktach o dużej świetlności. „Świetlność” jest terminem oznaczającym liczbę zderzeń na sekundę. Początkowe kłopoty ISR wyraźnie ukazują trudności z doprowadzaniem do zderzeń między dwoma lecącymi pociskami (dwoma wiązkami cząstek). W końcu urządzenie zostało usprawnione i osiągało ponad 5 milionów zderzeń na sekundę. Jeśli chodzi o fizykę, dokonano tam paru istotnych pomiarów, ale ISR dostarczył przede wszystkim cennego doświadczenia w dziedzinie technik detekcji i tego rodzaju akceleratorów w ogóle. ISR jest bardzo eleganckim urządzeniem zarówno pod względem zastosowanej w nim technologii, jak i prezencji - jest po prostu typowym wyrobem szwajcarskim. Pracowałem tam przez cały 1972 rok, a potem, w następnym dziesięcioleciu, często tam powracałem. Zaprosiłem kiedyś I. I. Rabięgo, który gościł w Genewie na konferencji „Atom dla Pokoju”, by zwiedził ISR. Gdy weszliśmy do eleganckiego tunelu akceleratora, Rabi zawołał: „Ach, Patek Philippe!”

Budowa najbardziej skomplikowanych akceleratorów - tych, które ciskają protony przeciw antyprotonom - stała się możliwa dzięki genialnemu Rosjaninowi, Gersonowi Budkerowi, który pracował w Nowosybirskim Radzieckim Miasteczku Naukowym. Budker budował maszyny elektronowe w Rosji, konkurując z amerykańskim przyjacielem Wolfgangiem Panofskym. Potem przeniesiono go do Nowosybirska, do nowej uniwersyteckiej placówki badawczej na Syberii. Ponieważ Panofsky, jak ujął to Budker, nie został przeniesiony na Alaskę, dalsze współzawodnictwo stało się już nie *fair* i rosyjski uczoney musiał wymyślić coś innego.

W latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych Budker kierował w Nowosybirsku kwitnącym kapitalistycznym systemem sprzedaży małych akceleratorów dla potrzeb radzieckiego przemysłu w zamian za materiały i pieniądze potrzebne do kontynuowania badań. Fascynowała go możliwość używania antyprotonów jako jednego z elementów czołowego zderzenia w akceleratorze, ale zdawał sobie sprawę, że stanowią one bardzo trudno dostępny towar. Można je otrzymać jedynie w wysokoenergetycznych zderzeniach, gdzie powstają za sprawą $E = mc^2$. W urządzeniu o mocy wielu dziesiątków GeV wśród odłamków pochodzących ze zderzeń można znaleźć tylko nieliczne antyprotony. Chcąc zebrać ich dostatecznie dużo, by otrzymać przyzwoitą liczbę zderzeń, trzeba by je zbierać przez wiele godzin. Poza tym antyprotony wyłaniają się ze zderzeń we wszystkich możliwych kierunkach. Naukowcy pracujący z akceleratorami określają ruch antyprotonów według ich energii, głównego kierunku ruchu i dodatkowej, poprzecznej składowej, która sprawia, że zajmują one całą dostępną przestrzeń komory próżniowej. Osiągnięciem Budkera było to, że dostrzegł możliwość „schładzania” tej poprzecznej składowej ruchu antyprotonów i ściśnięcia ich na czas przechowywania w znacznie bardziej zwartą wiązkę. To są bardzo skomplikowane sprawy: trzeba osiągnąć wyższy poziom kontroli wiązki, magnesy muszą być superstabilne, a próżnia doskonała. Antyprotony przechowuje się, chłodzi i zbiera przez ponad dziesięć godzin, zanim zgromadzi się ich wystarczająco dużo, by wstrzyknąć je do akceleratora i zacząć przyspieszanie. Pomysł był wspaniały, ale zbyt skomplikowany jak na ograniczone możliwości, którymi Budker dysponował na Syberii.

Na scenę wkracza Simon van der Meer, holenderski inżynier pracujący w CERN, który pod koniec lat siedemdziesiątych rozwinął technikę chłodzenia antyprotonów i przyczynił się do zbudowania ich źródła wykorzystanego w pierwszym akceleratorze protonowo-antyprotonowym. Van der Meer wykorzystał zbudowany w CERN pierścień o mocy 400 GeV w podwójnej roli pierścienia akumulacyjnego i akceleratora. Do pierwszych zderzeń protonów z antyprotonami doszło w 1981 roku. W roku 1985 van der Meer otrzymał Nagrodę Nobla (wraz z Carlem Rubbia) za wkład, jaki wniósł w opracowanie metody tzw. chłodzenia stochastycznego. Jego prace były elementem programu, którym kierował Carlo Rubbia i który doprowadził do odkrycia cząstek W^+ , W^- i Z^0 . Jeszcze powrócę do tych cząstek.

Carlo Rubbia to postać tak barwna, że zasługuje na osobną książkę (poświęcono mu już co najmniej jedną: Nobel Dreams Garry'ego Taubesa). To jeden z najgenialniejszych absolwentów słynnej Scuola Normale w Pizie, której studentem był także Enrico Fermi. Rubbia jest niewyczerpanym źródłem energii. Pracował na Uniwersytecie Columbia, w CERN, na Harvardzie, w Fermilabie, znowu w CERN, znowu w Fermilabie. Podróżował tak często, że w końcu opracował skomplikowany system oszczędnościowy, polegający na odpowiednim wymianianiu zbędnych połówek biletów „tam” i z powrotem”. Pewnego razu na chwilę udało mi się go przekonać, że kiedy będzie przechodził na emeryturę, zostanie mu osiem nie wykorzystanych biletów, wszystkie na loty w jednym kierunku, na zachód. W roku 1989 został dyrektorem CERN. W tym czasie ośrodek ten już od paru lat dzierżył palmę pierwszeństwa w dziedzinie zderzeń protonów z antyprotonami. Jednak w latach 1987-1988 tawatron wysunął się na prowadzenie, gdy w Fermilabie wprowadzono znaczne usprawnienia metody opracowanej w CERN i uruchomiono własne źródła antyprotonów.

Antyprotony nie rosną na drzewach, nie można ich też kupić w żadnym sklepie. W latach dziewięćdziesiątych Fermilab jest największym na świecie magazynem tych cząstek, które przechowuje się w pierścieniu magnetycznym. W futurystycznym raporcie, opracowanym przez US Air Force wspólnie z Rand Corporation, czytamy, że antyprotony byłyby idealnym paliwem raketowym, gdyż 1 mg (jedna tysięczna grama) tych cząstek może dostarczyć tyle samo energii, co dwie tony ropy. Skoro Fermilab jest światowym liderem w dziedzinie produkcji antyprotonów (10^{10} sztuk na godzinę), to ile czasu potrzebowałyby na wyprodukowanie jednego miligrama? Przy współczesnym tempie zajęłoby mu to kilka milionów lat nieprzerwanej pracy. Można sobie wyobrazić, że jakieś niesłychanie zmyślne usprawnienia techniczne mogłyby zredukować ten okres do kilku tysięcy lat. Toteż raczej nie radzę inwestować w Antyprotonowy Fundusz Powierniczy.

Proces zderzania protonów z antyprotonami przebiega w Fermilabie następująco: główny pierścień starego akceleratora - niegdyś o mocy 400 GeV - pracując na poziomie 120 GeV co dwie sekundy wystrzeliwuje w kierunku tarczy wiązkę protonów. Podczas każdego takiego bombardowania, w którym bierze udział około 10^{12} protonów, powstaje mniej więcej 10 milionów antyprotonów o odpowiedniej energii, zmierzających we właściwym kierunku. Na każdy wyprodukowany antyproton przypadają tysiące niepotrzebnych pionów, kaonów i innych odpadków, ale wszystkie te cząstki są nietrwałe i prędzej czy później znikają. Antyprotony kierowane są do dodatkowego pierścienia magnetycznego, gdzie są ogniskowane, a potem przenoszone do pierścienia akumulacyjnego. Oba te pierścienie mają po około 160 metrów obwodu i przechowują antyprotony o energii 8 GeV, takiej samej, jaką mają protony w akceleratorze wspomagającym. Potrzeba 5-10 godzin, aby zgromadzić antyprotony potrzebne do wstrzyknięcia do układu

akceleratorowego. Z przechowywaniem antimaterii wiąże się pewien subtelny problem, ponieważ cała nasza aparatura, wszystkie urządzenia zrobione są z materii (a z czegoż by innego?). Jeśli antimateria spotkałaby się z materią, doszłoby do anihilacji. Dlatego musimy szczególnie starannie utrzymywać antyprotony na orbicie położonej możliwie jak najbliżej centrum komory próżniowej. A i jakość tej próżni musi być nadzwyczajna - powinniśmy dysponować najlepszym „nic” dostępnym na rynku.

Po około dziesięciu godzinach akumulowania i sprężania jesteśmy już gotowi do wstrzyknięcia antyprotonów z powrotem do akceleratora, z którego pochodzą. Trzeba w tym celu przejść przez skomplikowaną procedurę przypominającą odliczanie przed startem statku kosmicznego. Chodzi o to, by każde napięcie, każde natężenie, każdy magnes i każdy przełącznik był dokładnie w takim stanie, jak należy. Antyprotony wpadają do głównego pierścienia, gdzie dzięki swemu ujemnemu ładunkowi krążą w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara. Są przyspieszane do energii 150 GeV i zwrócić przemieszczane - znów tunelami magnetycznymi - do nadprzewodzącego pierścienia tevatronu. Tu cierpliwie czekają protony, wstrzyknięte z akceleratora wspomagającego za pośrednictwem głównego pierścienia. Protony niezmordowanie krążą w zwykły sobie sposób, zgodnie z ruchem wskazówek zegara. Mamy więc teraz dwie wiązki mknące w pierścieniu o obwodzie 6,5 km. Każda wiązka składa się z sześciu garstek, z których każda zawiera około 10^{12} protonów (antyprotonów w garstce jest nieco mniej).

Obie wiązki są przyspieszane od 150 GeV - energii, którą uzyskały w głównym pierścieniu - aż do 900 TeV - maksymalnej energii osiągalnej w tevatronie. Ostatni etap to „ściskanie”. Ponieważ wiązki krążą w przeciwnych kierunkach w tej samej, niewielkiej komorze próżniowej, bez wątplenia ich ścieżki przecinały się już podczas fazy przyspieszania. Jednak ich gęstość jest tak niewielka, że zderzenia są bardzo sporadyczne. Włączenie specjalnego magnesu kwadrupolowego rozpoczyna fazę „ściskania”: przekrój wiązki zmniejsza się od paru milimetrów (średnica słomki do napojów) do paru mikrometrów (średnica ludzkiego włosa). Teraz, gdy wiązki się mijają, za każdym razem zachodzi przynajmniej jedno zderzenie. Magnesy reguluje się w ten sposób, by zderzenia odbywały się w samym środku detektorów. Reszta należy właśnie do nich.

Gdy wszystko przebiega już regularnie i zgodnie z planem, włącza się detektory i rozpoczyna zbieranie danych. Zazwyczaj trwa ono przez 10-20 godzin, a w tym czasie akumulują się nowe antyprotony. Z biegiem czasu wiązki protonów i antyprotonów się zużywają, stają się coraz rzadsze, co powoduje, że zmniejsza się częstość zderzeń. Gdy świetlność (liczba zderzeń na sekundę) spada do około 30 procent maksymalnej wartości i jeśli nazbierało się już dostatecznie dużo nowych antyprotonów w pierścieniu akumulacyjnym, wyrzuca się zużyte wiązki i rozpoczyna się kolejne odliczanie w stylu NASA. Napełnianie akceleratora nowymi cząstkami trwa około pół godziny. Uważa się, że potrzeba co najmniej 200 miliardów antyprotonów, by warto było rozpocząć nowy cykl zderzeń, a im więcej się ich zgromadzi, tym lepiej. W akceleratorze antyprotony spotykają około 500 miliardów znacznie łatwiej dostępnych protonów, biorąc w efekcie udział w około 100 tysiącach zderzeń na sekundę. Usprawnienia wszystkich faz opisywanego procesu, których wdrożenie planuje się na lata dziewięćdziesiąte, mogą doprowadzić do dziesięciokrotnego zwiększenia powyższych liczb.

W roku 1990 akcelerator w CERN przeszedł na zasłużony odpoczynek, ustępując pola Fermilabowi i jego dwóm potężnym detektorom.

Zagłądanie do czarnej skrzynki: detektory

Subatomowe królestwo poznajemy dzięki obserwacjom, pomiarom i analizom zderzeń zachodzących między wysokoenergetycznymi cząstkami. Ernest Rutherford zamykał swoich asystentów w ciemnym pokoju, by mogli zobaczyć i policzyć rozbłyski wywołane przez uderzenia cząstek a w ekrany pokryte siarczkiem cynku. Obecnie dysponujemy znacznie doskonalszymi technikami zliczania cząstek. Okresem szczególnie gwałtownego ich rozwoju były lata powojenne.

Przed drugą wojną światową używano przede wszystkim komory mgłowej. Za jej pomocą Anderson odkrył pozyton. Można ją było znaleźć we wszystkich laboratoriach, w których zajmowano się promieniowaniem kosmicznym. Jedno z moich zadań na Uniwersytecie Columbia polegało na zbudowaniu komory mgłowej, która miała współpracować z cyklotronem Nevis. Byłem wtedy zupełnie zielonym doktorantem i nie miałem najmniejszego pojęcia o subtelnościach związanych z funkcjonowaniem tych komór, a musiałem się zmierzyć ze specjalistami z Berkeley, Caltech, Rochester i innych podobnych ośrodków. Komory mgłowe są okropnie kapryśnymi urządzeniami, łatwo ulegają „zatruciom” - drobne zanieczyszczenia mogą powodować powstawanie dodatkowych kropelek, oprócz tych, które wykreślają ślady cząstek. Nikt na całym naszym uniwersytecie nie miał doświadczenia z tymi obmierzłymi detektorami. Przystudiowałem całą literaturę i zastosowałem się do wszystkich reguł, jeśli nawet wydawały mi się zwykłymi przesadami: czyścić szyby wodorotlenkiem sodu i płukać trzykrotnie destylowaną wodą; wygotować gumową uszczelkę w czystym alkoholu metylovym; wypowiedzieć odpowiednie zaklęcia... Krótka modlitwa też nie zaszkodzi.

Zdesperowany, poszukałem rabina, który by pobłogosławił moją komorę mgłową. Niestety, źle trafiłem. Okazał się ortodoksyjnym Żydem. Gdy poprosiłem go, by odmówił *brucha* (po hebrajsku: błogosławieństwo) nad moją komorą mgłową, chciał wiedzieć, co to takiego. Pokazałem mu zdjęcie, na co on się strasznie uniósł, że proponuję świętokradztwo. Następny rabin, którego znalazłem, był konserwatystą. Po obejrzeniu zdjęcia zapytał, jak taka komora działa. Wyjaśniłem. Słuchał, kiwał głową, gładził brodę i w końcu ze smutkiem stwierdził, że, niestety, nie może spełnić mojej prośby: „Takie prawo...” Poszedłem więc do rabina Synagogi Reformowanej. Właśnie wysiadał ze swego jaguara, gdy dotarłem do jego domu. „Rabinie, czy możesz odmówić *brucha* nad moją komorą mgłową?” - poprosiłem. „*Brucha?* - powiedział - a co to takiego?” Nic więc dziwnego, że się martwiłem.

Wreszcie byłem gotów na przeprowadzenie wielkiej próby. Wszystko powinno już działać, ale za każdym razem, gdy włączałem komorę, pojawiał się w niej gęsty biały dym. Wtedy właśnie przyjechał do Columbia Gilberto Bernardini i zajął mi przez ramię.

- Jaki pręcik tam wetknąłeś do komory? - zapytał.

- To moje radioaktywne źródło - odpowiedziałem - które ma wytwarzać ślady, ale ciągle powstaje tylko ten dym.

- Wyj go.

- Wyjąć?

- *Si, si*, wyjąć.

No więc wyjąłem i już kilka minut później... ślady! Piękne falujące nitki maleńkich kropelek zawieszonych w mojej komorze mgłowej. Najpiękniejszy widok, jaki w życiu podziwiałem! Rzecz w tym, że moje miliukirowe źródło promieniowania było zbyt silne i

wypełniało całą komorę jonami, z których każdy wytworzył wokół siebie kropelkę wody. W rezultacie pojawiał się gęsty, biały dym. Nie potrzebowałem radioaktywnego źródła. Promieniowanie kosmiczne, wszechobecne w otaczającej nas przestrzeni, w zupełności wystarczało. *Ecco!*

Komora mgłowa okazała się bardzo produktywnym urządzeniem, ponieważ można było robić fotografie maleńkich kropelek formujących się wzdłuż toru przelatujących przez nią cząstek. Umieszczenie jej w polu magnetycznym powodowało zakrzywienie torów cząstek, a pomiar promienia krzywizny pozwalał na określenie ich pędu. Im mniej zakrzywiony jest tor cząstki, tym większa jej energia. (Przypomnij sobie, drogi Czytelniku, protony w cyklotronie Lawrence'a, które nabierając pędu zakreślały coraz większe koła). Zrobiliśmy tysiące zdjęć, z których uzyskaliśmy rozmaite dane na temat własności pionów i mionów. Komora mgłowa - rozpatrywana jako przyrząd, a nie jako przyczynę do mojego doktoratu i posady na uczelni - pozwoliła nam zaobserwować kilkadziesiąt śladów na każdej fotografii. Przelot pionu przez komorę mgłową trwa około miliardowej części sekundy. Możemy wyposażyć komorę w płytkę materiału o dużej gęstości, w którym dojdzie do zderzenia. Ślady takich zderzeń obserwujemy na mniej więcej jednej fotografii na sto. Ponieważ zdjęcia możemy robić co minutę, widać stąd, że tempo zbierania danych jest raczej ograniczone.

Kłopoty z pęcherzykami

Zastosowanie komory pęcherzykowej, wynalezionej w połowie lat pięćdziesiątych przez Donalda Glasera z Uniwersytetu Stanu Michigan, stanowiło następne znaczne usprawnienie techniki wykrywania cząstek. Pierwsza komora pęcherzykowa była po prostu małym naczynkiem zawierającym ciekły eter. Ewolucji komór wykorzystujących ciekły wodór aż do rozmiarów pięciometrowego monstrum, które zakończyło swą działalność w roku 1987 w Fermilabie, przewodził słynny Luis Alvarez z Uniwersytetu Kalifornijskiego.

W wypełnionej cieczą (często jest to ciekły wodór) komorze wzdłuż toru przelatującej cząstki tworzą się maleńkie pęcherzyki. Wskazują one na to, że rozpoczął się proces wrzenia, wywołany nagłym, gwałtownym zmniejszeniem ciśnienia w cieczy. Zmniejszenie ciśnienia powoduje, że temperatura cieczy jest wyższa niż jej temperatura wrzenia, która zależy od ciśnienia. (Możemy się zetknąć z tym zjawiskiem, próbując ugotować jajko w wysokogórskim schronisku. Przy obniżonym ciśnieniu, jakie panuje na szczytach gór, woda wrze w temperaturze znacznie niższej niż 100°C). Czysta ciecz, choćby była nie wiadomo jak gorąca, wrze bardzo niechętnie. Na przykład olej rozgrzany w głębokim garnku do temperatury wyższej niż jego normalna temperatura wrzenia nie będzie wrzał, o ile tylko i olej, i garnek są naprawdę czyste. Ale gdy tylko wrzucimy jeden kawałek ziemniaka, olej zacznie gwałtownie wrzeć. Tak więc, aby otrzymać pęcherzyki potrzebne są dwie rzeczy: temperatura wyższa niż punkt wrzenia i jakieś zanieczyszczenia, wokół których mogłyby się formować pęcherzyki. W komorze pęcherzykowej ciecz osiąga stan przegrzania na skutek gwałtownego spadku panującego w komorze ciśnienia. Naładowana cząstka, biorąc udział w licznych delikatnych zderzeniach z atomami cieczy, pozostawia za sobą sznur pobudzonych atomów, które po obniżeniu ciśnienia staną się idealnymi zarodkami dla formowania się pęcherzyków. Jeśli nadlatująca cząstka zderza się z protonem (jądrem wodoru) wewnątrz komory, można prześledzić wszystkie naładowane cząstki będące produktami tego zderzenia. Ponieważ

ośrodkiem jest tu ciecz, niepotrzebne są płytki gęstego materiału i wyraźnie widać sam punkt zderzenia. Naukowcy na całym świecie zrobili miliony zdjęć zderzeń w komorach pęcherzykowych, a w analizie tych fotografii pomagają im automatyczne skanery.

Cały proces polega więc na tym, że akcelerator posyła w kierunku komory pęcherzykowej wiązkę cząstek. Jeśli są to cząstki naładowane, w komorze zaczyna się formować 10 lub 20 śladów. W ciągu około jednej milisekundy od przejścia cząstki tłok w komorze zostaje szybko przesunięty do góry, obniżając w ten sposób ciśnienie i inicjując formowanie się pęcherzyków. Po upływie kolejnej milisekundy, podczas której rozrastają się pęcherzyki, rozbłyska światło flesza, przesuwa się film w aparacie i jesteśmy gotowi na powtórzenie całej procedury od początku.

Mówi się, że pomysł zastosowania pęcherzyków zaświtał Glaserowi (który po otrzymaniu Nagrody Nobla za ten wynalazek niezwłocznie został biologiem) podczas obserwacji piany w kufle piwa. Dodanie odrobiny soli do napitku powodowało wyraźne zwiększenie ilości piany. Tak oto bary okolic Ann Arbor w stanie Michigan odegrały istotną rolę w stworzeniu jednego z najlepszych przyrządów stosowanych podczas poszukiwań Boskiej Cząstki.

W analizie zderzeń najważniejsze są dwa czynniki: przestrzeń i czas. Chcielibyśmy zarejestrować trajektorię cząstki w przestrzeni i dokładny czas jej przelotu. Na przykład: cząstka wpada do detektora, zatrzymuje się, rozpada i daje początek wtórnej cząstce. Dobrym przykładem zatrzymującej się cząstki jest mion, który może rozpaść się na elektron pojawiający się w około milionową część sekundy po zatrzymaniu się mionu. Im precyzyjniejszy detektor, tym więcej informacji dostarcza. Komory pęcherzykowe są znakomitymi narzędziami pozwalającymi na analizę przestrzenną zderzenia. Cząstki pozostawiają ślady, które możemy zlokalizować z dokładnością do jednego milimetra. Nie dostarczają jednak żadnych informacji na temat czasu zdarzeń.

Liczniki scyntylicyjne pozwalają lokalizować cząstki zarówno w czasie, jak i w przestrzeni. Naładowana cząstka, która wpada do licznika wykonanego ze specjalnego tworzywa, powoduje błysk światła. Liczniki owinięte są czarną światłoczułą folią i każdy maleńki błysk przekazywany jest do elektronicznego fotonowielacza, który przetwarza sygnał informujący o przejściu cząstki w wyraźny impuls elektroniczny. Gdy ten impuls zostaje nałożony na ciąg sygnałów zegara elektronicznego, można określić przybycie cząstki z dokładnością do paru miliardowych sekundy. Jeśli zastosuje się kilka takich warstw scyntylicyjnych, przejście cząstki spowoduje powstanie kilku impulsów, opisujących jej trajektorię w przestrzeni. Dokładność określania położenia w przestrzeni zależy od rozmiarów licznika, ale zazwyczaj sięga ona kilku centymetrów.

Ogromnym przełomem było wprowadzenie proporcjonalnej komory drutowej (Proportional Wire Chamber - PWC) - wynalazku niezwykle twórczego Francuza z CERN, Georges'a Charpaka. Był on bohaterem francuskiego ruchu oporu w czasie drugiej wojny światowej i więźniem obozu koncentracyjnego. Po wojnie stał się wybitnym wynalazcą urządzeń detekcyjnych. Jego PWC to genialne i bardzo „proste” urządzenie, składające się z ramy, na której jest rozpięta drobniutka drabinka cieniutkich drucików odległych jeden od drugiego o kilka milimetrów. Rama ma zazwyczaj rozmiary 60 cm x 120 cm; mieści się na niej kilkaset drucików przymocowanych równoległe do krótszego boku. Napięcia elektryczne są tak dobrane, że cząstka przelatująca w pobliżu drucika wytwarza w nim impuls elektryczny, który jest rejestrowany. Dokładne określenie położenia pobudzonego drutu pozwala zlokalizować jeden punkt na trajektorii cząstki. Czas przejścia cząstki otrzymuje się przez porównanie z zegarem elektronicznym. Dzięki ko-

lejnym ulepszeniom obecnie można określać położenie cząstki w czasie i przestrzeni z dokładnością do mniej więcej 0,1 mm i 10^{-8} s. Mając wiele takich ram włożonych do szczelnej skrzyni wypełnionej stosownym gazem, można dokładnie prześledzić tor ruchu cząstki. Ponieważ taka komora jest czynna tylko przez bardzo krótki okres, przypadkowe zdarzenia pojawiające się w tle są wytłumiane i można stosować bardzo intensywne wiązki. PWC jest częścią każdego większego eksperymentu, jaki przeprowadzono gdziekolwiek od 1970 roku. W roku 1992 Charpak (sam!) otrzymał Nagrodę Nobla za ten wynalazek.

Wszystkie te rodzaje czujników, a także wiele innych, wchodzi w skład wyrafinowanych detektorów stosowanych w latach dziewięćdziesiątych. CDF w Fermilabie jest typowym przedstawicielem najbardziej skomplikowanych detektorów. Wysoki na trzy piętra, ważący 500 ton i wybudowany kosztem 60 milionów dolarów służy do obserwacji zachodzących w tevatronie zderzeń między protonami a antyprotonami. Około stu tysięcy czujników - do których należą liczniki scyntylacyjne i proporcjonalne komory drutowe - misternie ze sobą połączonych i współpracujących przekazuje strumień informacji w postaci impulsów elektronicznych do układu, który porządkuje, filtruje i wreszcie rejestruje dane przeznaczone do dalszych analiz.

Podobnie jak w wypadku wszystkich tego typu detektorów, napływ informacji jest tak wielki, że nie sposób opracowywać je na bieżąco. Dlatego przetwarzane są do postaci cyfrowej, porządkowane i przygotowywane do zapisu na taśmie magnetycznej. Komputer musi zdecydować, które zderzenia są „interesujące”, a które nie, ponieważ w tevatronie w każdej sekundzie zachodzi ich blisko 100 tysięcy, a oczekuje się, że liczba ta wzrośnie wkrótce do miliona. Większość tych zderzeń nie kryje w sobie nic ciekawego. Klejnotami są te, w których kwark ukryty w protonie naprawdę łącznie w antykwark albo nawet w gluon w antyprotonie. Takie „twarde” zderzenia są jednak bardzo rzadkie.

Układ opracowujący dane ma mniej niż milionową część sekundy na zbadanie każdego zderzenia i podjęcie brzemiennej w skutki decyzji: czy jest ono interesujące? Takie tempo byłoby paraliżujące dla człowieka, ale nie dla komputera. Wszystko jest względne. W jednym z dużych miast gang ślimaków napadł i obrabował żółwia. Pytany przez policję poszkodowany odpowiadał: „Nie wiem, to wszystko zdarzyło się tak szybko!”

Żeby ułatwić podejmowanie decyzji, wprowadzono hierarchiczny system selekcji zderzeń. Eksperymentatorzy programują komputery w ten sposób, aby uwzględniały one rozmaite „wyzwalacze” - wskazówki mówiące układowi, które zderzenia powinien rejestrować. Na przykład za typowy „wyzwalacz” uznaje się zdarzenie, podczas którego detektor rejestruje dużą ilość energii, ponieważ jest większe prawdopodobieństwo, że nowe zjawiska pojawią się przy wysokich energiach. Określanie tych cech zdarzenia, które mają służyć komputerowi jako wyzwalacze jest bardzo delikatną robotą. Określ je zbyt szeroko, a przeciążysz pojemność pamięci układów rejestrujących. Zawęż je, a okaże się, że przegapiłeś jakieś ciekawe zjawiska albo że cały eksperyment poszedł na marne. Niektóre wyzwalacze zadziałają, gdy elektron o wysokiej energii wyłoni się ze zderzenia, inne - kiedy cząstki opuszczające rejon zderzenia będą miały postać wąskiego strumienia i tak dalej. Zazwyczaj 10-20 różnych rodzajów cech zderzenia może uruchomić dany wyzwalacz. Całkowita liczba zderzeń przepuszczonych przez to pierwsze sito może wynosić 5-10 tysięcy na sekundę. Liczba ta pozwala już pomyśleć i zbadać - robi to, oczywiście, komputer - wszystkie kandydaty bardziej dokładnie. Czy naprawdę

chcemy zarejestrować to zdarzenie? Analiza tego typu przebiega na czterech lub pięciu poziomach, aż wreszcie do zarejestrowania zostaje zakwalifikowanych 5-10 zdarzeń na sekundę.

Każde z nich zapisywane jest na taśmie magnetycznej ze wszystkimi szczegółami. Często się zdarza, że na etapie selekcji zbieramy także próbki - powiedzmy jedno na sto - zdarzeń odrzuconych, aby upewnić się, czy nie zaprzepaszczamy jakichś ważnych informacji. Cały ten system zbierania danych (*Data Acquisition System* - DAQ) możliwy jest dzięki bezbożnemu aliansowi między fizykami, którzy myślą, że wiedzą, czego chcą, inżynierami elektronikami, którzy z całych sił pragną ich zadowolić, i, oczywiście, dzięki rewolucji w mikroelektronice wykorzystującej osiągnięcia przemysłu półprzewodnikowego.

Zbyt wielu geniuszy pracowało nad technologiczną stroną tego całego przedsięwzięcia, by można było ich tu wymienić. Jednak według mojej subiektywnej opinii jednym z naprawdę wyjątkowych nowatorów był skromny inżynier, który działał w przybudówce przy laboratorium Nevis, gdzie się kształciłem. William Sippach wyraźnie przerażał swych zleceniodawców, fizyków. My złożyliśmy zamówienia, a on zaprojektował i zbudował DAQ. Nie raz zdarzało nam się dzwonić do niego o trzeciej nad ranem, bo właśnie natknęliśmy się na poważne ograniczenie w jego (zawsze było „jego”, kiedy mieliśmy problemy) układzie elektronicznym. Wysłuchiwał nas spokojnie, a potem mówił: „Widzisz mikroprzełącznik pod pokrywą szesnastego stelaża? Przełącz go i będzie po problemie. Dobranoc”. Sława Sippacha rozeszła się po świecie i zazwyczaj w każdym tygodniu można było spotkać gości z New Haven, Palo Alto, Genewy czy Nowosybirsk, którzy wpadali, żeby z nim pogadać.

Sippach i wielu innych, którzy przyczynili się do rozwoju tych skomplikowanych systemów, są kontynuatorami wspaniałej tradycji zrodzonej w latach trzydziestych i czterdziestych, kiedy wynaleziono obwody używane w pierwszych detektorach cząstek. Te z kolei stały się istotnymi składnikami cyfrowych komputerów pierwszej generacji. A z nich zrodziły się lepsze akceleratory i detektory, które z kolei dały początek...

W całym tym interesie wszystko opiera się na detektorach.

Czego się dowiedzieliśmy: akceleratory i postęp w fizyce

Wiesz teraz, drogi Czytelniku, wszystko, co powinieneś wiedzieć o akceleratorach, a może nawet więcej. Możliwe, że wiesz więcej niż niejeden teoretyk. To nie złośliwość, tylko stwierdzenie faktu. Ale najważniejsze jest to, co te nowe maszyny powiedziały nam o świecie.

Jak wspomniałem, synchrociklotrony z lat pięćdziesiątych pozwoliły nam dowiedzieć się wiele o pionach. Teoria Hideki Yukawy sugerowała, że silne oddziaływanie, które wiąże protony z protonami, protony z neutronami i neutrony z neutronami, może powstawać na skutek wymiany cząstki o określonej masie. Yukawa przewidział masę oraz długość życia tej cząstki - pionu.

Masa spoczynkowa pionu wynosi 140 MeV. Maszyny o mocy 400-800 MeV w ośrodkach uniwersyteckich na całym świecie produkowały te cząstki w dużych ilościach. Pion rozpada się na mion i neutrino. Mion - wielka zagadka lat pięćdziesiątych -

sprawił wrażenie cięższej wersji elektronu. Richard Feynman był jednym z wybitniejszych teoretyków, którzy łamali sobie głowę nad dwoma obiektami, które pod wieloma względami zachowują się identycznie, z tą tylko różnicą, że jeden z nich jest 200 razy cięższy od drugiego. Bardzo nam zależy na rozwiązaniu tej zagadki. Wydaje się, że jej rozwiązanie może prowadzić do Boskiej Cząstki.

Następna generacja maszyn sprawiła nam wielką niespodziankę: podczas bombardowania jąder cząstkami o energiach sięgających miliarda elektronowoltów działo się „coś innego”. Powtórzmy sobie przy okazji, co można osiągnąć za pomocą akceleratora, zwłaszcza, że zbliża się termin egzaminu końcowego. W zasadzie współczesne akceleratory i detektory pozwalają nam na dwie rzeczy: rozpraszanie obiektów albo - i to właśnie jest to „coś innego” - produkowanie nowych obiektów.

1. *Rozpraszanie.* W eksperymentach rozproszeniowych obserwujemy, w jaki sposób bombardujące cząstki po zderzeniu rozlatują się na wszystkie strony. Technicznym określeniem produktu końcowego takich eksperymentów jest „rozkład kątowy”. Gdy analizuje się takie doświadczenie zgodnie z regułami fizyki kwantowej, możemy się wiele dowiedzieć o jądrze, na którym rozpraszają się przyspieszone cząstki. W miarę wzrostu energii cząstek przybywających z akceleratora coraz wyraźniej ukazuje się struktura jądra. Dzięki temu poznaliśmy części składowe jądra - neutrony i protony - oraz dowiedzieliśmy się, jak są względem siebie ułożone i jak się poruszają, aby zachować ten swój układ przestrzenny. Gdy dalej zwiększamy energię naszych bombardujących protonów, możemy „zajrzeć” do wnętrza protonów i neutronów.

Aby uprościć całą sprawę, możemy w charakterze tarcz używać pojedynczych protonów (jąder wodoru). Dzięki eksperymentom rozproszeniowym poznaliśmy rozmiary protonu oraz dowiedzieliśmy się, jak rozkłada się w nim dodatni ładunek elektryczny. Bystry czytelnik może zapytać, czy sama sonda - cząstka uderzająca w tarczę - nie przyczynia się do ogólnego zamieszania? Odpowiedź brzmi: tak. Dlatego właśnie używamy rozmaitych rodzajów sond. Cząstki α ze źródeł radioaktywnych ustąpiły miejsca protonom i elektronom wystrzeliwanym z akceleratorów, potem zaczęto używać wtórnych cząstek: fotonów pochodzących z elektronów, pionów pochodzących ze zderzeń protonów z jądrami. W miarę jak coraz lepiej opanowywaliśmy tę technikę, w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych w charakterze pocisków zaczęliśmy używać cząstek trzeciej generacji. Sondami stały się miony i neutrina, produkty rozpadu pionów oraz wiele innych rodzajów cząstek.

Laboratorium przeobraziło się w centrum usługowe sprzedające rozmaite produkty. Pod koniec lat osiemdziesiątych dział sprzedaży oferował potencjalnym klientom następujące rodzaje zimnych i gorących wiązek: protony, neutrony, piony, kaony, miony, neutrina, antyprotony, hiperony, spolaryzowane protony (o jednakowym spinie) oraz oznakowane fotony (o znanej energii), a jeśli potrzebne Ci są jakieś inne, wystarczy zamówić!

2. *Produkcja nowych cząstek.* Pragniemy się przekonać, czy osiągnięty nowy obszar energii pozwala wytwarzać nowe nie-widziane-dotąd cząstki. Jeśli tak, to chcemy się o tych cząstkach jak najwięcej dowiedzieć: poznać ich masę, ładunek, spin; określić, do której rodziny należą i tak dalej. Ciekawi nas też, jaki jest ich średni czas życia i jak się rozpadają. Oczywiście, musimy im nadać imię i określić, jaką rolę odgrywają w wielkim układzie architektonicznym świata cząstek. Pion odkryto w promieniowaniu kosmicznym, ale szybko się przekonaliśmy, że nie pojawia się w komorze mgłowej ni stąd, ni zowąd w dojrzałej postaci. Życiorys pionu wygląda następująco: protony pocho-

dzące z promieniowania kosmicznego wpadają do ziemskiej atmosfery, gdzie zderzają się z jądrami azotu i tlenu (dziś oprócz tych dwóch pierwiastków mamy też sporo zanieczyszczeń). Na skutek tych zderzeń powstają piony. W trakcie badań nad promieniowaniem kosmicznym zidentyfikowano także parę innych, dziwacznych obiektów, jak na przykład K^+ , K^- i obiekty zwane lambda (oznaczone grecką literą Λ). Coraz więcej egzotycznych cząstek zaczęło powstawać w latach pięćdziesiątych, gdy pałeczkę przejęły akceleratory o większej mocy. W latach sześćdziesiątych strumyk nowych obiektów przerodził się już w powódź. Ogromne ilości energii dostępnej w zderzeniach pozwoliły na odkrycie nie jednej, pięciu czy dziesięciu, ale całych setek nowych cząstek, o których nawet nie śniło się większości naszych filozofów, Horacjuszu. Odkrycia te były efektem grupowego wysiłku, owocem Wielkiej Nauki i rozwoju nowych technologii i technik w eksperymentalnej fizyce cząstek elementarnych.

Każdemu nowemu obiektowi nadaje się imię, wybierając zazwyczaj jedną z greckich liter. Odkrywcy, zwykle zespół składający się z sześćdziesięciu trzech i połowy naukowca, obwieszcza światu znalezienie nowego obiektu i podaje możliwie najbardziej obszerną listę jego własności - masę, ładunek, spin, średni czas życia i inne liczby kwantowe. Następnie członkowie zespołu piszą jedną lub dwie prace doktorskie i czekają na zaproszenia na seminaria, konferencje i na awans. Przede wszystkim zależy im, by inni potwierdzili ich odkrycie, najlepiej stosując inną technikę, tak aby zminimalizować błędy pomiarowe. Chodzi o to, że każdy akcelerator wraz ze swym detektorem ma tendencję do specyficznego „widzenia” zdarzeń. Realność zdarzenia powinna zatem zostać potwierdzona przez inną parę oczu.

Komora pęcherzykowa świetnie się sprawdziła przy odkrywaniu cząstek, ponieważ można było obserwować i mierzyć wiele szczegółów bliskich spotkań. Eksperymenty, w których brały udział elektroniczne detektory, zazwyczaj miały na celu badanie bardziej specyficznych procesów. Gdy nowa cząstka znajdzie się już w gronie obiektów, których istnienie uda się potwierdzić, nadchodzi czas, by wykonać następny krok. Planuje się konkretne rodzaje zderzeń i projektuje urządzenia, które umożliwiłyby zebranie danych na temat innych jej własności, takich jak średni czas życia - wszystkie nowe cząstki są nietrwałe - i sposobów jej rozpadu. Λ na przykład rozpada się na proton i pion, Σ na Λ i pion i tak dalej. Zestawić tabelę, uporządkować, nie dać się przytłoczyć temu strumieniowi danych - oto wytyczne pozwalające na zachowanie zdrowych zmysłów, podczas gdy subatomowy świat rozrasta się i wykazuje coraz bardziej złożoną strukturę. Wszystkie cząstki nazwane greckimi literami, powstające w wyniku zderzeń z udziałem oddziaływania silnego, określa się mianem hadronów (po grecku *hadros* oznacza ciężki), a odkryto ich całe setki - dosłownie. Nie tego się spodziewaliśmy. Zamiast jednej, maleńkiej, niepodzielnej cząstki, poszukiwania demokrytejskiego a-tomu dostarczyły nam setek ciężkich i bardzo podzielnych cząstek. Nieszczęście! Od kolegów biologów nauczyliśmy się, co można robić, kiedy zupełnie nie wiadomo co robić: klasyfikować! I temu zajęciu oddaliśmy się bez reszty. Rezultaty i konsekwencje tej klasyfikacji omówię w następnej części.

Trzy finały: wehikuł czasu, katedry i akcelerator na orbicie

Zakończę tę część, przedstawiając nowy pogląd na temat tego, co naprawdę dzieje się podczas zderzeń w akceleratorach. Pogląd ten przekazali nam koledzy astrofizycy (niewielka, ale bardzo zabawna grupa astrofizyków znalazła sobie schronienie w Fermilabie). Ludzie ci zapewniają, a nie mamy powodu, by im nie wierzyć, że świat został stworzony jakieś 15 miliardów lat temu w gigantycznej eksplozji, zwanej Wielkim Wybuchem. W pierwszych chwilach po stworzeniu nowo narodzony Wszechświat był gęstą, gorącą zupą pierwotnych cząstek, które zderzały się ze sobą z energiami (odpowiednimi do panującej wówczas temperatury) znacznie wyższymi, niż potrafimy sobie choćby w przybliżeniu wyobrazić. Ale w miarę rozszerzania się Wszechświat robił się coraz chłodniejszy. W pewnym momencie, około 10^{-12} sekundy po stworzeniu, średnia energia cząstek pływających w gorącej kosmicznej zupie spadła do 1 TeV, czyli do wartości, jaką teatron wytwarza w każdej ze swych wiązek. Tym sposobem możemy akcelerator traktować jako wehikuł czasu. Na krótką chwilę, podczas czołowego zderzenia protonów, teatron odtwarza warunki panujące we Wszechświecie, gdy jego wiek wynosił milionową milionową część sekundy. Możemy obliczyć ewolucję Wszechświata, jeśli znamy prawa fizyki działające w każdej epoce i warunki przekazane danej epoce przez poprzednią.

To zastosowanie akceleratora jako wehikułu czasu stanowi poważny problem dla astrofizyków. W normalnych warunkach my, fizycy cząstek elementarnych, bylibyśmy nieźle ubawieni, a może nawet mile połączani, ale nie interesowałoby nas za bardzo, czy akceleratory imitują wczesny Wszechświat, czy też nie. Jednak w ostatnich latach zaczęliśmy dostrzegać związek. W tych zamierzonych czasach, kiedy panowały energie znacznie przewyższające 1 TeV - granica osiągalna przez nasze współczesne maszyny - kryje się potrzebna nam wskazówka. Ten wcześniejszy, gorętszy Wszechświat zawiera sekret, którego rozwiązanie może nas zaprowadzić do Boskiej Cząstki.

Akcelerator jako wehikuł czasu - powiązanie z astrofizyką - jest problemem wartym rozważenia. Na inne powiązania zwrócił uwagę Robert Wilson, kowboj i budowniczy akceleratora, pisząc:

„[Projektując Fermilab] braliśmy pod uwagę zarówno estetyczne, jak i techniczne względy. Dopatrzyłem się nawet, co podkreślam z naciskiem, dziwnego podobieństwa między katedrą a akceleratorem: jedna budowla miała na celu osiągnięcie niezmiernie wysokości w przestrzeni, druga - dotarcie do podobnych wyżyn w zakresie energii. Niewątpliwie estetyczny wdzięk obu struktur jest z natury swej techniczny. W katedrze dostrzegamy go w funkcjonalności ostrołukowego sklepienia, w doskonale wykorzystanej i jakże dramatycznie wyrażonej równowadze między działającymi nań siłami. Również w akceleratorze estetyka technologii uwidacznia się w sposób doskonały. Mamy tu spiralność orbit. Mamy elektryczny napór i magnetyczny odpór. Obie siły działają w nieustającym porywie skupienia aż do osiągnięcia najwyższej formy wyrazu, ale tym razem w postaci energii świetlistej wiązki cząstek.

Tak niesiony na fali uczuć, głębiej przyjrzałem się budowli katedry. Dostrzegłem uderzające podobieństwo, łączące niewielkie społeczności budowniczych katedr z budowniczymi akceleratorów. Obie grupy skupiały w sobie odważnych nowatorów, w obu panowała zacięta rywalizacja, zwłaszcza między przedstawicielami różnych narodowości, a jednocześnie obie były internacjonalistyczne. Lubię porównywać wielkiego Maître d'Oeuvre, Sugera od Saint Denis z Cockcroftem z Cambridge albo Sully'ego od Notre-Dame z Lawrencem z Berkeley, czy Villarda de Honnecourt z Budkerem z Nowosybirską”.

Mogę do tego dodać tylko, że istnieje jeszcze jeden głębszy związek: zarówno katedry, jak i akceleratory budowano wysiłkiem wielkiej wiary. I oba te rodzaje budowli stanowiły źródło duchowych wzlotów, transcendencji i dzięki modlitwie - objawienia. Oczywiście, nie wszystkie katedry działały.

Jednym ze wspanialszych momentów w naszej pracy jest ta chwila, gdy w zatłoczonym pomieszczeniu kontrolnym szefowie (w tym szczególnym dniu) stają przy pulpitych sterowniczych i wszyscy wpatrują się w ekrany. Wieloletni wysiłek naukowców i inżynierów ma lada chwila przynieść owoc w postaci przyspieszonej wiązki, która bierze początek w butli z wodorem i wyłania się z misternego układu wnętrza maszyny... Działa! Jest wiązka! Szampan wypełnia styropianowe kubki, a radość i uniesienie maluje się na wszystkich twarzach. W naszej świętej metaforze widzę robotników, którzy mocują ostatnie gargulce, podczas gdy księża, biskupi i kardynałowie razem z nieodzownym garbatym dzwonnikiem otaczają ołtarz w pełnym napięcia skupieniu, by przekonać się, czy działa.

Oceniając akcelerator, oprócz jego gigaelektronowoltów i innych technicznych atrybutów trzeba też wziąć pod uwagę jego estetyczną wartość. Możliwe, że za kilka tysięcy lat archeolodzy i antropolodzy będą oceniać naszą kulturę na podstawie akceleratorów. Są one przecież największymi maszynami, jakie stworzyła nasza cywilizacja. Dziś zwiędzamy piramidy egipskie albo Stonehenge i podziwiamy nie tylko ich piękno, lecz także osiągnięcia techniczne, dzięki którym budowle te mogły powstać. A przecież służyły one także i naukowym celom: stanowiły przecież „obserwatoria”, z których można było śledzić ruchy ciał niebieskich. Z podziwem patrzymy dziś na wielkie budowle wzniesione przez starożytne kultury, które próbowały mierzyć ruchy ciał na sklepieniu niebieskim w dążeniu do osiągnięcia harmonii z Wszechświatem. Forma i funkcja łączyły się ze sobą w takich budowlach, jak Stonehenge czy piramidy, po to, by ich budowniczości mogli zgłębiać naukowe prawdy. Akceleratory są naszymi piramidami, naszym Stonehenge.

Trzeci finał dotyczyć będzie naszego patrona, Enrico Fermiego, jednego z najśłynniejszych fizyków lat trzydziestych, czterdziestych i pięćdziesiątych XX wieku. Był Włochem. Jego prace w Rzymie - zarówno teoretyczne, jak i eksperymentalne - miały ogromne znaczenie i zgromadziły wokół niego tłum wyjątkowo zdolnych studentów. Był wspaniałym i oddanym nauczycielem. W roku 1938 otrzymał Nagrodę Nobla, a ceremonię jej odbioru potraktował jako okazję do ucieczki z faszystowskich Włoch i osiadł w USA.

Sława, jaką się cieszył w całym amerykańskim społeczeństwie, brała się stąd, że kierował zespołem, który w czasie drugiej wojny światowej zbudował w Chicago pierwszy działający stos atomowy. Po wojnie Fermi zgromadził na Uniwersytecie w Chicago grupę genialnych studentów - teoretyków i eksperymentatorów. Jego uczniowie z okresu rzymskiego i chicagowskiego rozproszyli się po świecie, wszędzie zdobywając najwyższe stanowiska i nagrody. „Dobrego nauczyciela poznaje się po tym, ilu jego studentów otrzymało Nagrodę Nobla” - mówi stare azteckie przysłowie.

W roku 1954 Fermi wygłosił pożegnalne przemówienie przy okazji składania rezygnacji z funkcji prezydenta Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego. Na wpół żartobliwie, na wpół poważnie przewidywał, że w niedalekiej przyszłości na orbicie okołoziemskiej zbudujemy akcelerator wykorzystujący naturalną próżnię przestrzeni kosmicznej. Zwrócił też uwagę, że można by go zbudować, wykorzystując wojskowe budżety Związku Radzieckiego i Stanów Zjednoczonych. Za pomocą kieszonkowego kalkulatora obliczyłem, że jeśli zastosujemy nadprzewodzące magnesy, możemy osiągnąć 50 tysię-

cy TeV za cenę 10 bilionów dolarów, nawet bez zniżek za zakupy w ilościach hurtowych. Czyż może być lepszy sposób na przywrócenie światu zdrowych zmysłów niż przekucie mieczy na akceleratory?

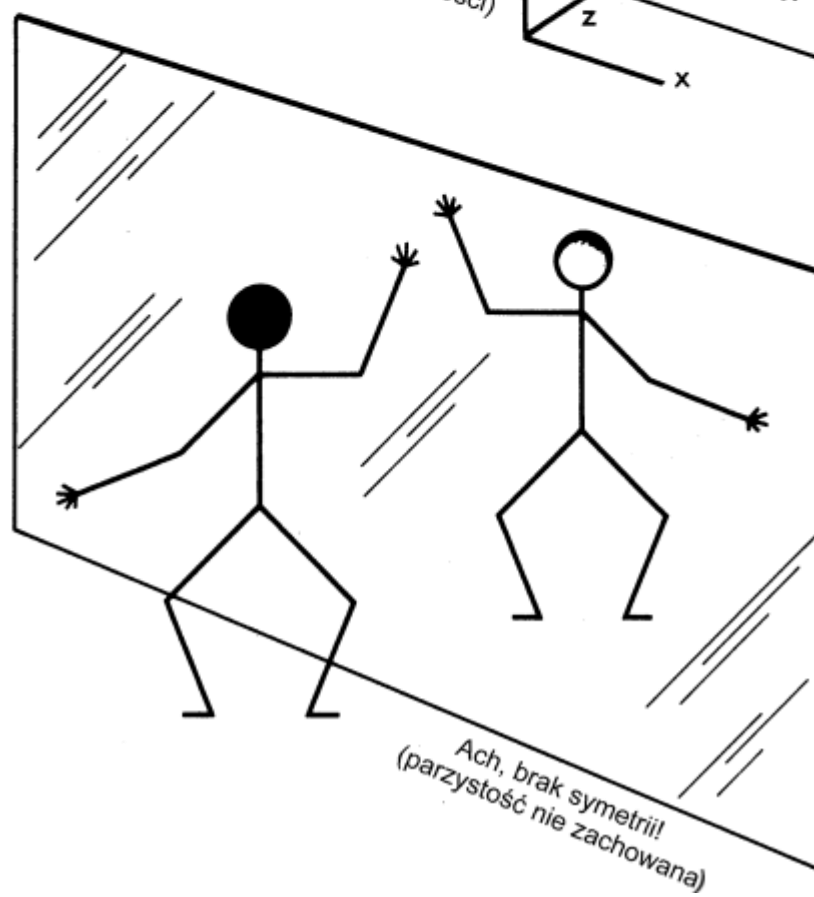
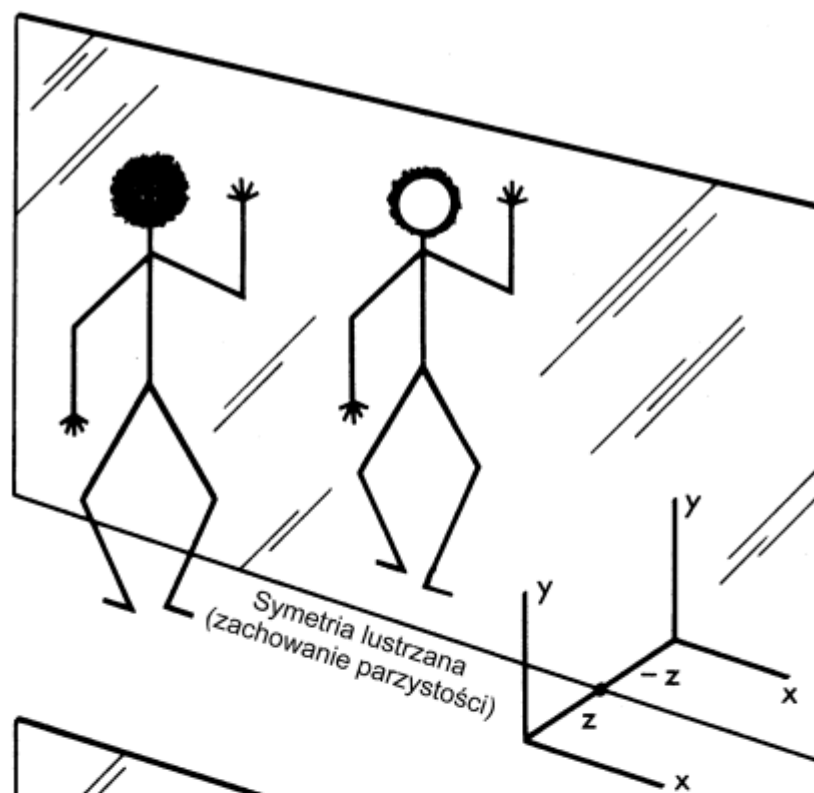
10. Interludium C: Jak w ciągu weekendu złamaliśmy parzystość i... odkryliśmy Boga

Nie wierzę, by Bóg był słabym mańkutem.
WOLFGANG PAULI

Spójrz, drogi Czytelniku, na swoje odbicie w lustrze. Nie najgorzej, co? Przypuśćmy, że unosisz prawą rękę i twoje odbicie też unosi prawą. Co takiego? Niemożliwe, chyba chodzi o lewą! Niewątpliwie przeżyłbyś szok, gdyby uniosła się niewłaściwa ręka. O ile wiem, żadnemu człowiekowi nigdy się to nie przydarzyło, ale podobne zjawisko zaobserwowano w przypadku cząstki elementarnej, zwanej mionem.

Symetria zwierciadlana była wielokrotnie poddawana próbom w licznych eksperymentach. Jej naukowe określenie brzmi „zachowanie parzystości”. Chcę teraz opowiedzieć o ważnym odkryciu i o tym, jak często postęp w nauce odbywa się za cenę uśmiercenia pięknej teorii za pomocą brzydkiego faktu. Wszystko zaczęło się w piątek podczas *lunchu*, a zakończyło we wtorek o czwartej nad ranem. Bardzo głęboko zakorzenione pojęcie o tym, jak funkcjonuje przyroda, okazało się nieporozumieniem. Tych kilka godzin zbierania danych na zawsze zmieniło sposób, w jaki pojmujemy świat. Gdy obalane są eleganckie teorie, rodzi się w nas swego rodzaju niepokój. Wygląda na to, że przyroda jest bardziej nieporadna i niezgrabna, niż przypuszczaliśmy. Pewną pociechę przynosi nadzieja, że kiedy już wszystko zostanie poznane, ukaże się nam głębsze piękno. Tak też było z upadkiem parzystości w styczniu 1957 roku w Irvington-on-Hudson, 32 km na północ od Nowego Jorku.

Fizycy kochają symetrię, bo jest w niej matematyczne i intuicyjne piękno. Przykładem symetrii w sztuce są Tadz Mahal i starożytne świątynie greckie. W przyrodzie muszle, proste organizmy i rozmaite kryształy wykazują symetryczną budowę o niezwykłym pięknie; podobnie jak niemal doskonała dwustronna symetria ludzkiego ciała. Prawa przyrody zawierają bogaty zestaw symetrii, które przez wiele lat, a przynajmniej przed styczniem 1957 roku, wydawały się absolutne i doskonałe. Były one ogromnie pomocne, gdy próbowaliśmy zrozumieć kryształy, wielkie cząsteczki, atomy i cząstki elementarne.



Eksperyment w lustrze

Jedną z tych symetrii zwano symetrią zwierciadlaną (lustrzaną) albo zasadą zachowania parzystości. Zgodnie z tą zasadą natura - prawa fizyki - nie pozwala na odróżnienie zdarzeń zachodzących w rzeczywistym świecie od tych, które dzieją się po drugiej stronie lustra.

Stosowne twierdzenie wyrażone językiem matematycznym, które podaję jedynie *pro forma*, mówi, że równanie opisujące prawo przyrody nie zmieni się, gdy współrzędną z wszystkich ciał zamienimy na -z. Jeśli oś z jest prostopadła do lustra, które wyznacza płaszczyznę, to ta zamiana odpowiada dokładnie temu, co zdarza się dowolnemu układowi odbijającemu się w lustrze. Jeśli na przykład znajdujesz się (albo atom) w odległości 16 jednostek miary długości od lustra, to obraz, który w nim widzisz, jest także oddalony od niego o 16 jednostek. Na skutek zastąpienia współrzędnej z przez -z powstaje lustrzane odbicie. Jeśli jednak równanie jest niezmiennicze względem tej zamiany (to znaczy, jeśli zmienna z zawsze występuje w równaniu w postaci z^2), to symetria obowiązuje i parzystość jest zachowana.

Jeśli jedna ze ścian laboratorium, w którym pracują fizycy, jest lustrem, to lustrzane odbicia tych fizyków wykonują lustrzane odbicia eksperymentów. Czy istnieje jakiś sposób pozwalający jednoznacznie określić, które laboratorium jest rzeczywiste, a które odbite? Czy Alicja mogła za pomocą jakiegoś obiektywnego kryterium rozstrzygnąć, czy znajdowała się po tej czy po tamtej stronie lustra? Czy komitet składający się ze sławnych uczonych mógłby powiedzieć, czy zapis filmowy jakiegoś eksperymentu pochodzi z prawdziwego czy z lustrzanego laboratorium? W grudniu 1956 roku jednoznaczna odpowiedź na wszystkie te pytania brzmiała: nie. Zespół ekspertów w żaden sposób nie mógł udowodnić, że film przedstawia lustrzane odbicie eksperymentu odbywającego się w prawdziwym laboratorium. W tym momencie jakiś bystry prostaczek mógłby zauważyć: „Ale popatrz, wszyscy naukowcy w tym filmie mają guziki poprzyszywane po lewej stronie. To musi być lustrzane odbicie”. „Nie - odpowiedzą uczeni - to tylko konwencja, żadne prawo przyrody nie mówi nic o tym, po której stronie mają znajdować się guziki. Musimy odłożyć na bok wszystkie nasze ludzkie przyzwyczajenia i zobaczyć, czy cokolwiek w naszym filmie jest sprzeczne z prawami fizyki”.

Tak więc przed styczniem 1957 roku nie znano żadnych zjawisk, których lustrzane odbicie przeczyłoby prawom przyrody. Świat i jego lustrzane odbicie były równoprawnymi opisami natury. Wszystko, co działo się w przestrzeni po drugiej stronie lustra, mogło w zasadzie - i w praktyce - zostać powtórzone w przestrzeni laboratorium. Parzystość była bardzo pożyteczna. Pomagała nam klasyfikować różne stany cząsteczek, atomów i jąder. Można też dzięki niej zaoszczędzić sobie trochę zachodu. Jeśli stoi przed tobą rozebrany doskonały okaz człowieka, w połowie ukryty za pionową zasłoną, przyglądając się jego widocznej części można się mniej więcej domyślić, jak wygląda reszta. Taka jest poezja parzystości.

Upadek parzystości, jak później określano wydarzenia stycznia 1957 roku, stanowi doskonały przykład tego, jak naukowcy rozumują, jak radzą sobie po przeżytych wstrząsach i jak matematyka oraz teoria dostosowują się do wyników pomiarów i obserwacji. Natomiast zupełnie nietypowa w tej historii była szybkość, z jaką wszystko się rozegrało, i względna prostota odkrycia.

Café Szanghaj

Piątek, 4 stycznia, godzina dwunasta w południe. Zgodnie z utartą od lat tradycją w piątki jadalśmy *lunch* w chińskiej restauracji. Wykładowcy z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Columbia zebrali się przed gabinetem profesora Tsung Dao Lee. Dziesięcioro czy piętnaścioro fizyków pomaszzerowało do *Café Szanghaj*, mieszczącej się na rogu 125. Ulicy i Broadwayu. Tradycja wspólnych posiłków sięgała 1953 roku, gdy Lee przybył do Nowego Jorku z Uniwersytetu w Chicago jako młody doktor o reputacji teoretycznej supergwiazdy.

Tym piątkowym posiłkom towarzyszyły niepoahamowane i hałaśliwe dyskusje, czasem na trzy lub cztery tematy równocześnie, przerywane pełnym zadowolenia siorbaniem zupy z melonów i rozdzielaniem potrawy ze smoczego mięsa, ogórków morskich, smażonych krewetek czy innych pikantnych specjałów kuchni północnochińskiej, która w tamtych czasach nie była jeszcze tak bardzo modna. Już w drodze do restauracji wykladował się temat dnia: parzystość i najświeższe wiadomości od naszej koleżanki z Columbia, Chien Shiung Wu, która prowadziła właśnie eksperyment w Biurze Standardów w Waszyngtonie.

Zanim zagłębiliśmy się w poważniejszą dyskusję, Lee wypełnił swój cotygodniowy rytuał ustalenia *menu* naszego posiłku. Komponował je z wielką maestrią na kartce niewielkiego notesiku podanego mu przez usłużnego kelnera. Czynność tę podniósł do rangi sztuki. Spoglądał na jadłospis, potem na swój arkusik, rzucał kelnerowi pytanie w dialekcie mandaryńskim, marszczył brwi, zawieszał ołówek nad kartką i starannie kaligrafował kilka znaków. Następne pytanie, poprawka w jednym ze znaków, spojrzenie na wytłaczany cynowy sufit w poszukiwaniu natchnienia, a potem gwałtowny powrót do kaligrafowania. Wreszcie ostateczny sprawdzian: obie dłonie zawieszono nad kartką, jedna z wyprostowanymi palcami wyciągnięta w geście papieskiego błogosławieństwa nad tłumami, druga zaciśnięta na ogryzku ołówka. Czy jest już wszystko? *Yin* i *yang*, barwa, konsystencja, smak, czy wszystko należycie harmonizuje ze sobą? Kartka i ołówek zostają przekazane kelnerowi, a Lee rzuca się w wir konwersacji.

„Dzwoniła Wu i powiedziała, że wstępne wyniki wskazują na istnienie »ogromnego efektu«” - rzucił gorączkowo.

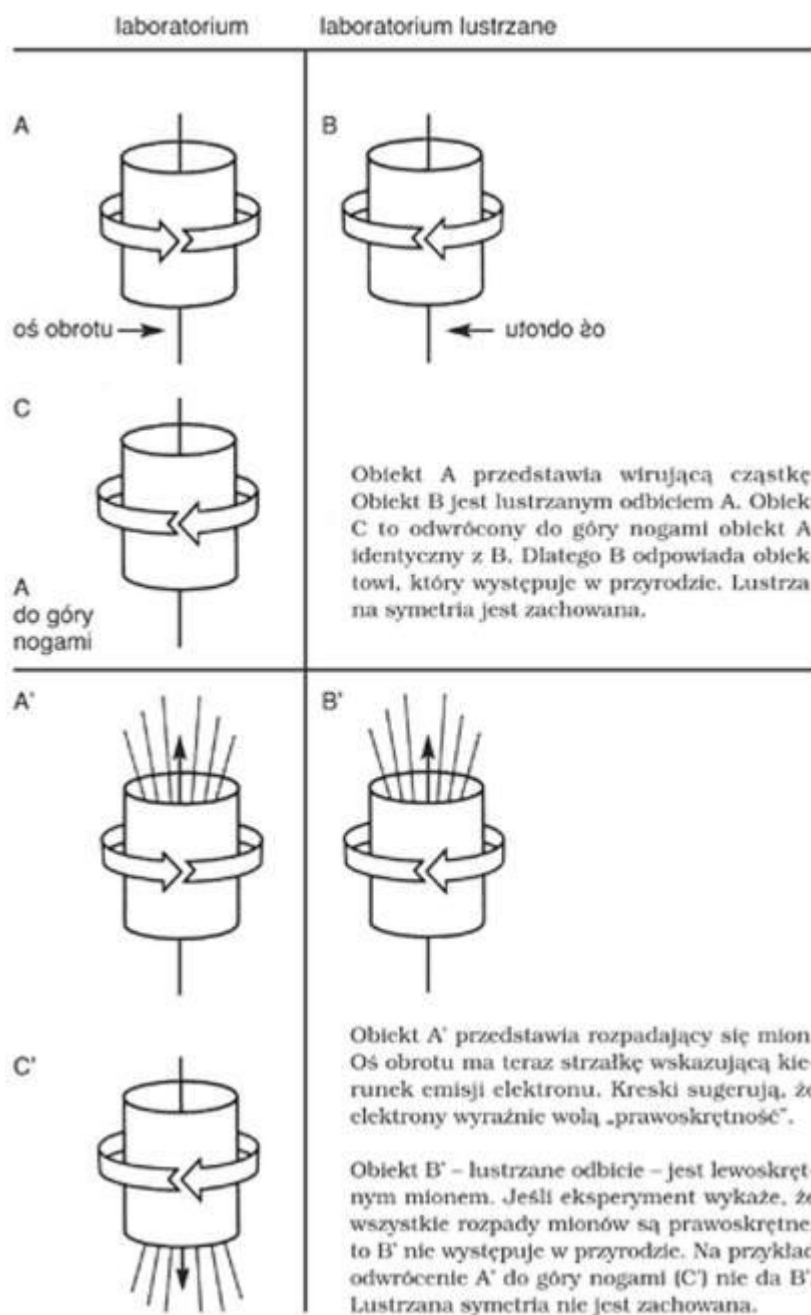
■
Powróćmy do laboratorium (w rzeczywistym świecie) z jedną ścianą wyłożoną lustrami. Zdajemy sobie sprawę z tego, że cokolwiek byśmy zrobili, jakichkolwiek eksperymentów nie przeprowadzili - rozpraszanie, produkcja nowych cząstek, badania grawitacji metodą Galileusza - wszystkie lustrzane odbicia będą posłuszne tym samym prawom przyrody, które rządzą w laboratorium. Zastanówmy się, w jaki sposób mogłoby się przejawiać pogwałcenie parzystości. Najprostszy, obiektywny sprawdzian skrętności, który potrafilibyśmy opisać także mieszkańcom planety Twilo, można przeprowadzić za pomocą zwykłego wkręta. Zwróciwszy wkręt główką do siebie, obróćmy go zgodnie z ruchem wskazówek zegara. Jeśli zagłębiamy się w kawałek drewna, określamy go jako prawoskrętny. Oczywiście, lustrzane odbicie ukazuje wkręt lewoskrętny, ponieważ facet w lustrze obraca go w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara, ale on i tak wchodzi w kawałek drewna. Przypuśćmy teraz, że żyjemy w świecie tak dziwnym (jak któryś ze światów w filmie *Star Trek*), iż nie jest możliwe - wbrew prawom fizyki - wykonanie lewoskrętnego wkręta. Oznaczałoby to złamanie lustrzanej symetrii. Nie

mógłby istnieć lustrzany obraz prawoskrętnego wkręta, parzystość zostałaby pogwałcona.

Tyle tytułem wstępu do zaproponowanej wspólnie przez Lee i jego kolegę z Princeton, Chen Ning Yanga, metody badania słuszności tego prawa w procesach, w których uczestniczy słabe oddziaływanie. Potrzebujemy zatem odpowiednika prawoskrętnej (albo lewoskrętnej) cząstki. Podobnie jak w przypadku wkręta, musimy połączyć obrót z kierunkiem ruchu. Rozważmy wirującą cząstkę, powiedzmy mion. Wyobraź ją sobie, drogi Czytelniku, jako cylinder wirujący wokół swej osi. Mamy więc obrót. Ponieważ końce cylindra-mionu są identyczne, nie potrafimy powiedzieć, czy wiruje zgodnie z ruchem wskazówek zegara, czy przeciwnie. By się o tym przekonać, umieść go między sobą a Twoim ulubionym oponentem. Ty przysięgasz, że cząstka wiruje w prawo, on się upiera, że nie, że w lewo. I nie ma sposobu, by rozstrzygnąć tę kwestię. Jest to sytuacja, w której parzystość jest zachowana.

Geniusz Lee i Yanga polegał na połączeniu tego zagadnienia z oddziaływaniem słabym (które chcieli zbadać) poprzez obserwację wirujących cząstek. Przypuśćmy, że jakieś prawo przyrody wymaga, by elektron wylatywał tylko z jednego końca cylindra-mionu. W ten sposób mamy wyznaczony kierunek. Teraz możemy określić rodzaj obrotu - zgodny lub przeciwny do kierunku ruchu wskazówek zegara - ponieważ zdefiniowaliśmy jeden z końców: ten, z którego wylatuje elektron. Ten koniec odgrywa dla nas rolę czubka wkręta. Prawoskrętnym mionem nazywamy wirujący zgodnie z ruchem wskazówek zegara względem końca, z którego wylatuje elektron. A teraz, JEŚLI te cząstki zawsze rozpadają się w sposób zgodny z naszą definicją prawoskrętności, to mamy do czynienia z procesem, który łamie symetrię zwierciadlaną. Możemy się o tym przekonać, ustawiając równolegle do lustra oś obrotu naszego mionu. Jego lustrzanym obrazem jest mion lewoskrętny, który NIE ISTNIEJE.

■
 Pogłoski dotyczące wyników eksperymentu Wu zaczęły się szerzyć już w czasie przerwy świątecznej, ale pracownicy Wydziału Fizyki zgromadzili się po raz pierwszy dopiero w piątek po Nowym Roku 1957. W tym czasie Chien Shiung Wu była, podobnie jak ja, profesorem fizyki na Uniwersytecie Columbia. Jako eksperymentator, miała ugruntowaną reputację. Specjalizowała się w radioaktywnych rozpadach jądra. Krótco trzymała swoich studentów i stażystów, była ogromnie energiczna, ostrożna w formułowaniu wniosków i bardzo ceniona za wysoką jakość publikowanych przez nią rezultatów. Studenci (za plecami) nazywali ją panią generalissimus Czang Kaj-szek.



Gdy latem 1956 roku Lee i Yang podali w wątpliwość zachowanie parzystości, Chien Shiung Wu niemal natychmiast ruszyła do akcji. Za obiekt swych badań wybrała radioaktywne jądro kobaltu 60. Jądro to rozpada się spontanicznie na jądro niklu, neutrino i dodatni elektron, czyli pozyton. „Zobaczyć” jednak można tylko to, że jądro kobaltu nagle wystrzeliwuje pozyton. Ten rodzaj radioaktywności określamy mianem rozpadu β , ponieważ emitowany w takim procesie elektron - dodatni albo ujemny - nazwano cząstką β . Dlaczego tak się dzieje? Fizycy nazywają to oddziaływaniem słabym, mając na myśli siłę, która powoduje tego typu reakcje. Siły nie tylko pociągają i popychają, przyciągają i odpychają, ale także potrafią wywołać zmiany gatunku, chociażby przemianę kobaltu w nikiel, której towarzyszy emisja leptonów. Od lat trzydziestych oddziaływaniu

słabemu przypisano ogromną liczbę reakcji. Wielki Enrico Fermi pierwszy ujął je w matematycznej formie, dzięki czemu zdołał przewidzieć wiele szczegółów reakcji takich, jak ta, w której uczestniczy kobalt 60.

Lee i Yang w swym artykule z roku 1956, zatytułowanym „Zagadnienie zachowania parzystości w oddziaływaniu słabym”, wybrali kilka reakcji i przeanalizowali je pod kątem eksperymentalnych konsekwencji przyjętego założenia: że w oddziaływaniu słabym parzystość, czyli symetria lustrzana, nie jest zachowana. Interesowało ich, w którym kierunku wyrzucane są elektrony z wirującego jądra. Gdyby się okazało, że elektrony wolą jakiś jeden kierunek bardziej niż inne, mielibyśmy do czynienia z sytuacją analogiczną do ubrania jądra kobaltu w zapinaną na guziki koszulę. Potrafilibyśmy odróżnić prawdziwy eksperyment od jego obrazu odbitego w lustrze.

Czym różni się genialny pomysł od tuzinkowej publikacji? Podobnie można zapytać o wiersz, obraz, kompozycję muzyczną, a nawet - nie do wiary! - notatkę służbową. W wypadku sztuk pięknych czas udziela ostatecznej odpowiedzi. Natomiast w nauce o tym, czy pomysł jest słuszny, czy nie, decyduje eksperyment. Jeśli idea jest nie tylko słuszna, lecz genialna, przed uczonymi otwiera się nowy obszar badań, rodzi się mnóstwo nowych pytań, a wiele starych wędruje do lamusa.

T. D. Lee miał wyjątkowo przenikliwy umysł. Niezależnie od tego, czy zamawiał *lunch*, czy wypowiadał się na temat jakiejś starochińskiej ceramiki lub zdolności studenta, jego uwagi zawsze trafiały w sedno. W pracy Lee i Yanga poświęconej parzystości (Yanga nie znałem tak dobrze) wyraźnie widoczna była ta cecha umysłowości Lee. Już samo kwestionowanie dobrze ugruntowanego prawa przyrody wymagało sporej dozy chińskiego tupetu. Lee i Yang zdawali sobie sprawę z tego, że całe to morze danych, które doprowadziło do akceptacji „dobrze ugruntowanego” prawa zachowania parzystości, nie dotyczyło oddziaływania słabego, związanego z rozpadem radioaktywnym. Mamy tu kolejne genialne spostrzeżenie: o ile wiem, wtedy właśnie po raz pierwszy dopuszczono myśl, że różne siły przyrody poddane są różnym zasadom zachowania.

Lee i Yang zakasali rękawy i przeanalizowali wielką liczbę reakcji rozpadu promieniotwórczego, które mogły posłużyć do sprawdzenia zasady lustrzanej symetrii. W artykule opisali te reakcje w najdrobniejszych szczegółach, aby tępi eksperymenci mogli zweryfikować prawomocność symetrii. Wu przeprowadziła jedną z tych reakcji, używając jądra kobaltu. Istotnym elementem jej metody było takie zaaranżowanie warunków wyjściowych, aby jądra kobaltu - a w każdym razie ich znaczna większość - miały jednakowy spin. Według Wu można to było osiągnąć, utrzymując jądra kobaltu 60 w bardzo niskiej temperaturze. Wu zaplanowała bardzo wyrafinowany eksperyment, który wymagał trudno dostępnych urządzeń kriogenicznych (pracujących w bardzo niskich temperaturach). Poszukiwania sprzętu zaprowadziły ją do Biura Standardów, gdzie dość dobrze opanowano już technikę orientowania spinów.

■
 Przedostatnim daniem tego piątkowego *lunchu* był wielki karp duszony w sosie z czarnej fasoli z szalotkami i porami. Gdy go spożywaliśmy, Lee wciąż powtarzał, że - jak głosiła fama - efekt obserwowany przez Wu okazał się wielki, ponad dziesięciokrotnie większy od spodziewanego. Były to nieoficjalne, wstępne dane, ale (T. D. podał mi głowę ryby, wiedząc, że bardzo ją lubię) jeśli udało się zaobserwować tak znaczny efekt, to tego właśnie moglibyśmy się spodziewać, gdyby neutrino były dwu-... Dalszy ciąg zdania nie dotarł do mnie, bo nagle zaczął mi kiełkować w głowie pewien pomysł.

Po *lunchu* miałem seminarium, radę wydziału, spotkanie przy herbacie i kolokwium. Brałem udział w tych wszystkich zajęciach, ale duchem byłem zupełnie gdzie indziej. Myśl, że Wu obserwowała „duży efekt”, nie dawała mi spokoju. Z referatu, który Lee wygłosił w Brookhaven w sierpniu, zapamiętałem, że możliwe do zaobserwowania efekty łamania symetrii lustrzanej w reakcjach rozpadu mionów i pionów powinny być małe.

„Duże efekty”? W sierpniu przez moment zastanawiałem się nad przebiegiem reakcji rozpadu pion-mion i wtedy zdałem sobie sprawę, że aby zaprojektować przekonujące doświadczenie, niezachowanie parzystości musiałyby wystąpić w dwóch kolejnych reakcjach. Próbowałem sobie przypomnieć obliczenia, które wtedy wykonaliśmy, a które doprowadziły nas do wniosku, że szanse powodzenia takiego eksperymentu są nikłe. Jeśli jednak efekt był wielki...

O szóstej po południu podążyłem już na północ, na obiad do domu w Dobbs Ferry, a stamtąd miałem jechać na spokojny dyżur razem z moim doktorantem w pobliskim Laboratorium Nevis w Irving-on-Hudson. Nevis, akcelerator o mocy 400 MeV, zaprzęgnięty został do produkcji i badań własności mezonów, które w latach pięćdziesiątych były stosunkowo nowymi i nieznanymi cząstkami. W tym szczęśliwym okresie znaleźliśmy niewiele mezonów, o które trzeba się było troszczyć, toteż Nevis troszczył się głównie o piony i miony.

W Nevis mieliśmy intensywne wiązki pionów powstających na skutek bombardowania tarczy protonami. Piony są nietrwałe i podczas lotu poza akcelerator, od tarczy przez osłonę aż do hali doświadczeń, około 20 procent tych cząstek ulega słabemu rozpadowi na mion i neutrino

$\pi \rightarrow \mu + \nu$ (w locie).

Miony zazwyczaj wędrowały w tym samym kierunku, co piony, z których brały początek. Jeśli prawo zachowania parzystości było rzeczywiście złamane, to istniałby nadmiar mionów, których oś spinu ustawia się równolegle do kierunku ruchu cząstki, w porównaniu z tymi, które mają oś spinu ustawioną przeciwnie. Jeśli efekt rzeczywiście był wielki, oznaczało to, że przyroda obdarowuje nas próbką cząstek o jednakowych spinach. Do takiej właśnie sytuacji próbowała doprowadzić Wu, chłodząc kobalt 60 w polu magnetycznym do bardzo niskich temperatur. Potem już wystarczyło tylko obserwować rozpad mionów o znanym spinie na elektrony i nieco neutrin.

Eksperyment

Duży ruch, jaki panuje w piątkowe wieczory na Saw Mill River Parkway, zazwyczaj nie pozwala się nacieszyć pięknym widokiem lesistych wzgórz otaczających drogę ciągnącą się wzdłuż rzeki Hudson. To gdzieś tu zaświtało mi, jakie możliwości otwiera przed nami „duży efekt”. W przypadku obiektu obdarzonego spinem, o „efekcie” mówimy wtedy, gdy podczas rozpadu preferuje on któryś z kierunków ustawienia osi spinu. Mały efekt mamy wtedy, gdy z 2000 wyemitowanych elektronów spin 1030 jest zorientowany w jedną stronę, a 970 w drugą. Byłby to efekt bardzo trudny do wykrycia. Ale duży efekt, powiedzmy 1500 do 500, można już znacznie łatwiej znaleźć i sama ta - błogosławiona - wielkość efektu przyczyniłaby się do uporządkowania spinu mionów. Aby przeprowadzić eksperyment, potrzebujemy mionów o jednakowym spinie. Ponieważ miały one wędrować z cyklotronu do detektorów, ten kierunek ich ruchu staje się kierunkiem od-

niesienia dla ich spinu. Chcemy, aby większość mionów była prawoskrętna (albo lewo-skrętna, to obojętne) względem kierunku ruchu. Miony przylecą, miną kilka liczników i zatrzymają się w bloku grafitowym. Wtedy policzymy, ile elektronów wylania się w kierunku, w którym poruszały się miony, a ile w kierunku przeciwnym. Istotna różnica między tymi dwiema liczbami byłaby dowodem złamania parzystości. Sława i bogactwo!

Nagle mój zwykły piątkowy spokój został zniszczony przez myśl, że moglibyśmy w bardzo prosty sposób przeprowadzić stosowny eksperyment. Mój doktorant, Marcel Weinrich, pracował nad doświadczeniem z udziałem mionów. Po niewielkich przeróbkach aparatura, którą przygotował, mogłaby posłużyć do poszukiwań dużego efektu. Przeanalizowałem w myśli sposób otrzymywania mionów w naszym akceleratorze. Mogłem uważać się za eksperta w tej dziedzinie, jako że pracowałem z Johnem Tinlotem nad zaplanowaniem zewnętrznej wiązki mionów i pionów parę lat wcześniej, gdy sam jeszcze byłem zielonym doktorantem.

Wyobraziłem sobie przebieg całego procesu: akcelerator, magnes z okrągłymi biegunami o średnicy 6 metrów, ważącymi po 4000 ton, między tymi magnesami jak w kanapce tkwi wielka stalowa komora próżniowa. W sam jej środek za pomocą maleńkiej rurki wstrzykiwany jest strumień protonów. Protony mkną po spiralnym torze, podczas gdy wysokie napięcie o częstotliwości radiowej popycha je z każdym okążeniem coraz prędeż i prędeż. Pod koniec tej spiralnej podróży cząstki osiągają energię około 400 MeV. Blisko brzegu komory, tam gdzie już prawie nie sięga oddziaływanie magnesu, tkwi niewielki pręt z kawałkiem grafitu i czeka na bombardowanie wysokoenergetycznymi protonami. Czteryście milionów elektronowoltów, które z sobą niosą, wystarcza, aby na skutek zderzenia z jądrami węgla w grafitowej tarczy powstały nowe cząstki - piony.

Oczywiście widziałem, jak piony wylatują dalej z pędem otrzymanym w spadku po protonach. Zrodzone między biegunami potężnego magnesu cyklotronu, biegną lekkim łukiem, opuszczają cyklotron i wykonują swój taniec przemijania. Na ich miejsce pojawiają się miony kontynuujące ich ruch. Szybko zanikające poza granicami magnesu pole magnetyczne pomaga jeszcze przepchnąć miony przez kanał w trzymetrowej betonowej ścianie osłony wprost do hali doświadczeń, gdzie już na nie czekamy.

W eksperymencie przygotowywanym przez Marcela miony miały być spowalniane w dziesięciocentymetrowym filtrze i zatrzymywane w blokach o grubości dwóch i pół centymetra, wykonanych z różnych pierwiastków. Energię traciłyby na skutek delikatnych zderzeń z atomami bloku i niosąc ujemny ładunek - w końcu zostawałyby pochwycone przez dodatnie jądro. Ponieważ nie chcieliśmy, by cokolwiek wywierało wpływ na sposób uporządkowania spinu mionów, pochwylenie ich na orbitę okołojądrową byłoby bardzo niepożądane, dlatego też korzystaliśmy z mionów o dodatnim ładunku. Co by robił dodatnio naładowany mion w bloku? Prawdopodobnie po prostu siedziałby tam sobie, wirując spokojnie, aż nadszedłby czas jego rozpadu. Należało bardzo starannie dobrać rodzaj tworzywa bloku i węgiel wydawał się odpowiedni.

A teraz najważniejsza myśl kierowcy, który pewnego styczniowego piątku zmierzał na północ: jeśli wszystkie (albo prawie wszystkie) miony zrodzone w procesie rozpadu pionów miałyby spiny skierowane w tę samą stronę, to oznaczałoby to, że w reakcji „pion \rightarrow mion” parzystość jest złamana, i to złamana silnie. Duży efekt! Przypuśćmy teraz, że oś spinu pozostaje równoległa do kierunku ruchu mionów, pomykających wdzięcznie po delikatnym łuku na zewnątrz maszyny (jeśli wartość czynnika g jest bliska 2, to właśnie dokładnie tak się dzieje). Przypuśćmy dalej, że niezliczone delikatne

zderzenia z atomami węgla, które stopniowo spowolniły mion, nie zaburzyły związku łączącego spin z kierunkiem ruchu. Gdyby to wszystko rzeczywiście było prawdą - *mirabile dictu!* - miałbym próbkę mionów siedzących w bloku grafitu ze spinami ustawionymi w jedną stronę.

Czas życia mionu - dwie mikrosekundy - bardzo nam odpowiadał. Eksperyment był już tak zaplanowany, by rejestrować elektrony, które wyłaniają się z rozpadających się mionów. Moglibyśmy zobaczyć, czy tyle samo mionów pojawia się w obu kierunkach wyznaczonych przez oś spinu. Byłby to test na zachowanie lustrzanej symetrii. Jeśli otrzymane liczby nie będą równe, będzie to oznaczało, że parzystość jest martwa. I to ja ją zabiłem! Ha!

Wyglądało na to, że potrzebne nam są co najmniej dwa cudy, aby eksperyment rzeczywiście się udał. To właśnie ta konieczność liczenia na dwa cudowne zdarzenia pod rząd zniechęciła nas w sierpniu, kiedy Lee i Yang przedstawiali swój artykuł, w którym mówili o niewielkich efektach. Jeden mały efekt dałby się może zarejestrować przy odrobinie cierpliwości, ale dwa pod rząd - powiedzmy jeden procent jednego procentu - sprawiały, że eksperyment nie powinien mieć żadnych szans powodzenia. Dlaczego dwa kolejne małe efekty? Pamiętaj, drogi Czytelniku, że najpierw musielibyśmy uzyskać piony rozpadające się na miony o jednakowym spinie (cud numer jeden). A potem w rozpadzie mionów na elektrony musiałyby się pojawić obserwowalna asymetria względem osi ich spinu (cud numer dwa).

Zanim zjechałem z autostrady w Yonkers, ogarnęło mnie podniecenie. Właściwie nie wątpiłem już, że jeśli parzystość była silnie złamana, to powinniśmy otrzymać spolaryzowane miony (wszystkie spiny zwrócone w tę samą stronę). Wiedziałem też, że w polu magnetycznym spin mionów pozostaje „przytwierdzony” do kierunku ruchu cząstki. Mniej pewien byłem tego, co się dzieje, gdy mion wpada do absorbującego energię grafitowego bloku. Gdybym nie miał racji, osie spinu cząstek mogłyby powykrzywiać się we wszystkie strony. A wówczas nie moglibyśmy obserwować kierunku emisji elektronów względem osi spinu.

Powtórzmy to wszystko jeszcze raz. W wyniku rozpadu pionów powstają miony o spinach zgodnych z kierunkiem ruchu macierzystych cząstek. To jest coś w rodzaju cudu. Musimy teraz zatrzymać miony tak, abyśmy mogli obserwować, w jakim kierunku emitowane są elektrony, które powstają w wyniku rozpadu mionów. Ponieważ znamy kierunek ruchu mionów, zanim osiągną grafitowy blok, wiemy również - jeśli nic nie zmieni tego kierunku - jaki jest ich spin, gdy się zatrzymują i rozpadają. Teraz musimy tylko tak przemieszczać wysięgnik z detektorem elektronów wokół bloku, w którym spoczywają miony, aby sprawdzić, czy lustrzana symetria jest zachowana.

Dłonie zaczęły mi się pocić, gdy tak powtarzałem sobie, co powinniśmy zrobić. Wszystkie liczniki były już na miejscu. Urządzenia elektroniczne informujące o przybyciu wysokoenergetycznych mionów i ich wnikaniu w blok grafitu (już jako spowolnione cząstki) też tkwiły już na właściwych miejscach i działały. Był też „teleskop” składający się z czterech liczników, który służył do wykrywania elektronów emitowanych przez rozpadające się miony. Jedyne, co nam pozostało do zrobienia, to umieścić te liczniki na jakiejś ruchomej platformie tak, aby można je było obracać wokół grafitowego bloku. Jedna albo dwie godziny pracy. Ojoj! Ekstra! Pomyślałem, że czeka nas długa i pracowita noc.

Gdy znalazłem się w domu, gdzie szybko zjadłem obiad i trochę pobaraszkowałem z dziećmi, zatelefonował Richard Garwin, fizyk pracujący dla IBM. Prowadził prace ba-

dawcze nad procesami atomowymi w laboratoriach należących do IBM, rozlokowanych w sąsiedztwie uniwersytetu. Richard był częstym gościem na Wydziale Fizyki, ale tego dnia akurat nie wybrał się z nami na *lunch* i dzwonił po to, by poznać najświeższe wieści na temat eksperymentu Wu. „Słuchaj, Dick, mam świetny pomysł, jak w prosty sposób sprawdzić łamanie parzystości. - Wyjaśniłem mu pospiesznie. - Może byś wpadł do laboratorium i trochę nam pomógł?” Garwin mieszkał w pobliżu, w Scarsdale. O ósmej wieczorem rozmontowywaliśmy już aparaturę pewnego bardzo skonfundowanego i zdenerwowanego doktoranta. Marcel przyglądał się, jak psujemy mu wszystko, co przygotował, żeby przeprowadzić swój dyplomowy eksperyment. Dick miał za zadanie przemyśleć problem związany z obracaniem teleskopu z detektorami elektronów tak, abyśmy mogli określić ich rozkład wokół osi spinu. Nie było to proste zadanie, ponieważ podczas przesuwania detektora moglibyśmy zmienić odległość dzielącą go od mionów i tym sposobem wpłynąć na ilość wykrywanych elektronów.

Wtedy właśnie Garwin wpadł na drugi, bardzo istotny dla powodzenia eksperymentu, pomysł. „Słuchaj - powiedział. - Zamiast obracać tę ciężką platformę, pozostawmy ją w miejscu; pokręcimy mionami siedzącymi w bloku”. Aż jęknąłem z zachwytem, gdy dotarło do mnie piękno i prostota tego rozwiązania. Oczywiście, wirująca naładowana elektrycznie cząstka jest maleńkim magnesem i w polu magnetycznym porusza się jak igła kompasu, z tą tylko różnicą, że mechaniczne siły działające na mion-magnesik obracają go w sposób ciągły. Pomysł był tak prosty, że aż genialny.

Nie mieliśmy żadnych trudności z obliczeniem wartości pola magnetycznego, potrzebnego do obrócenia mionów o 360° w rozsądnym czasie. Jak długi czas jest rozsądny z punktu widzenia mionu? Mion, który rozpada się na elektron i neutrino, ma okres połowicznego rozpadu równy 1,5 mikrosekundy ($1,5 \times 10^{-6}$ s). Oznacza to, że w ciągu 1,5 mikrosekundy połowa mionów przeniesie się na tamten świat. Gdybyśmy obracali je zbyt wolno - na przykład o 1° na mikrosekundę - większość mionów zniknęłaby, zanim blok obróciłby się o parę stopni. Nie moglibyśmy wówczas porównywać wydajności dla 0° i 180° , czyli liczby elektronów wyemitowanych z „góry” mionu w porównaniu z liczbą elektronów wyemitowanych z jego „dołu”, a przecież taki właśnie był cel naszego eksperymentu. Gdybyśmy, przykładając silne pole magnetyczne, zwiększyli prędkość obrotu do, powiedzmy, 1000° na mikrosekundę, emitowane elektrony omiatałyby detektor tak szybko, że otrzymalibyśmy wyniki rozmazane. Zdecydowaliśmy, że idealnym tempem obrotu będzie około 45° na mikrosekundę.

Nawinęliśmy na cylinder kilkaset zwojów miedzianego przewodu i przepuściliśmy prąd kilku amperów, dzięki czemu udało nam się otrzymać odpowiednie natężenie pola magnetycznego. Znaleźliśmy akrylowy cylinder i posłaliśmy Marcela do magazynu po więcej drutu, przycięliśmy blok grafitowy tak, aby mieścił się wewnątrz cylindra, i podłączyliśmy przewody do źródła prądu, którym można było zdalnie sterować - na półce znaleźliśmy nawet odpowiedniego pilota. O północy wszystko było gotowe. Pracowaliśmy w wielkim pośpiechu, bo akcelerator jest zawsze wyłączany w soboty o ósmej rano w celu przeprowadzenia przeglądów i napraw.

O pierwszej w nocy liczniki rejestrowały już dane, rejestry akumulacyjne zapisywały liczby elektronów wyemitowanych w różnych kierunkach. Dzięki pomysłowi Garwina nie mierzyliśmy tych kątów bezpośrednio. Elektronowy teleskop pozostawał w miejscu, a w polu magnetycznym obracały się miony, czy raczej wektory osi ich spinów. Toteż w tym układzie czas przybycia elektronu do detektora świadczył o kierunku, z którego pochodził. Mierząc czas, rejestrowaliśmy kierunek. Oczywiście, mieliśmy mnóstwo problemów.

Poprosiliśmy operatorów akceleratora, by dali nam jak najwięcej protonów uderzających w tarczę. Musieliśmy wyregulować wszystkie liczniki wychytujące przybycie i zatrzymanie mionów. Musieliśmy sprawdzić, czy we właściwy sposób kontrolujemy niewielkie pole magnetyczne działające na miony.

Po paru godzinach zbierania danych uwidoczniła się już wyraźna różnica między liczbami elektronów wyemitowanych w położeniach 0° i 180° względem wektora osi spinu. Dane były prowizoryczne i wprawiły nas w nastrój podniecenia zabarwionego na poły optymizmem, na poły sceptycyzmem. Gdy o ósmej rano przejrzelśmy uzyskane wyniki, stwierdziliśmy, że sceptycyzm miał swe uzasadnienie. Teraz dane były znacznie mniej przekonujące, niesprzeczne z hipotezą, że dopuszczalne są wszystkie kierunki emisji; wskazywały na zachowanie lustrzanej symetrii. Błagaliśmy operatorów, żeby dali nam jeszcze parę godzin, ale bez skutku. Harmonogram - rzecz święta. Przygnębieni zeszliśmy do hali akceleratora, gdzie znajdowała się aparatura. Tu stanęliśmy oko w oko z apokalipsą. Akrylowy cylinder, na który nawinęliśmy przewód, stopił się i pokrzywił na skutek wydzielonego przez prąd ciepła. W wyniku tego wypadł blok grafitowy. A zatem miony nie docierały do pola magnetycznego, które dla nich przygotowaliśmy. Po obwiniawszy się trochę nawzajem (i tak wiadomo, że zawsze winien jest student), nabraliśmy otuchy. Może jednak nasze pierwsze wrażenie było słuszne!

Zaplanowaliśmy, co musimy zrobić podczas *weekendu*. Zaprojektować odpowiednie pole magnetyczne. Spróbować przyspieszyć zbieranie danych poprzez zwiększenie liczby zatrzymanych mionów i zwiększenie odsetka zliczanych elektronów. Przemyśleć, co się dzieje z dodatnio naładowanymi mionami podczas delikatnych zderzeń w trakcie spowalniania i wtedy, gdy tkwią w sieci utworzonej przez atomy węgla. Przecież jeśli dodatni mion zdołałby pochwycić jeden z licznych wolnych elektronów poruszających się wewnątrz grafitu, to taki elektron łatwo mógłby doprowadzić do depolaryzacji (zaburzyć spin) mionu; a zatem nie zachowywałyby się one jednakowo.

Wszyscy trzej poszliśmy do swych domów, żeby się trochę przespać. Spotkaliśmy się znów o drugiej po południu. Ciężko pracowaliśmy przez cały weekend, każdy nad przydzielonym mu zadaniem. Ja zdołałem przeprowadzić obliczenia opisujące ruch mionu od chwili narodzin, kiedy wysyła go rozpadający się pion, poprzez podróż przez kanał i betonową osłonę aż do chwili, gdy dotrze do naszej aparatury. Prześledziłem jego spin i kierunek ruchu. Założyłem maksymalne złamanie parzystości: sytuację, gdy wszystkie miony mają spin ustawiony zgodnie z kierunkiem ruchu. Wszystko wskazywało na to, że jeśli symetria nie była zachowana w ogóle, lub choćby tylko w połowie, powinniśmy otrzymać sinusoidalną krzywą. W ten sposób moglibyśmy nie tylko udowodnić złamanie symetrii, lecz także otrzymać liczbę określającą, w jakim stopniu do tego doszło: od 100 procent aż do (nie! nie!) zera. Jeśli ktoś ci mówi, drogi Czytelniku, że naukowcy są beznamiętni i że cechuje ich chłodny obiektywizm, sam chyba jest szalony. Rozpaczliwie pragnęliśmy przekonać się o pogwałceniu parzystości. Ona nie była dziewczyną, a my nie byliśmy nastoletnimi wyrostkami, ale gorąco pragnęliśmy dokonać odkrycia. Naukowy obiektywizm polega na tym, że pasja nie ma wpływu na metodologię i samokrytycyzm.

Garwin zrezygnował z akrylowego walca, nawinał cewkę bezpośrednio na nowy kawałek grafitu i wypróbował trwałość tego układu, zwiększając dwukrotnie natężenie prądu, który był nam potrzebny. Marcel poprzestawiał liczniki, przesunął teleskop bliżej grafitowego bloku, sprawdził oraz poprawił wydajność wszystkich liczników i przez cały

czas się modlił, żeby z całego tego zamieszania wynikło cokolwiek, co dałoby się opublikować.

Praca powoli posuwała się do przodu. W poniedziałek rano wieści o naszych gorączkowych działaniach dotarły do załogi operatorów akceleratora i do niektórych naszych kolegów. Konserwatorzy wykryli poważne usterki w maszynie - nici z poniedziałku. Wiązka mogła zostać uruchomiona najwcześniej we wtorek o ósmej rano. No cóż, więcej czasu na ostatnie przygotowania, dopieszczanie szczegółów i sprawdzanie. Koledzy z uniwersytetu przyjechali do laboratorium przywieźwieni chęcią dowiedzenia się, co takiego knujemy. Jeden bystry młody człowiek, który uczestniczył w chińskim *lunchu*, zadał parę pytań i na podstawie moich wymijających odpowiedzi wywnioskował, że zamierzamy przeprowadzić eksperyment dotyczący parzystości.

„Nie da rady - pocieszyl mnie. - Miony ulegną depolaryzacji, tracąc energię w grafitowym filtrze”. Łatwo jest wprawić mnie w stan przygnębienia, ale znacznie trudniej zniechęcić. Pamiętałem słowa mojego mentora, wielkiego mędrca naszego uniwersytetu, Isidora Rabięgo: „Ze spinem sprawa jest śliska”.

Okolo szóstej wieczorem w poniedziałek, przed zapowiedzianym terminem, maszyna zaczęła dawać znaki życia. Przyspieszyliśmy przygotowania, sprawdziliśmy wszystkie urządzenia i układy. Zauważyłem, że nasza tarcza, ustawiona na dziesięciocentymetrowej podstawce, sprawiała wrażenie ustawionej trochę za nisko. Zmierzyłem, co trzeba, i okazało się, że rzeczywiście powinna być wyżej. Rozejrzałem się wokół w poszukiwaniu czegoś, co mogłoby ją podnieść o dwa, trzy centymetry. Dojrzałem leżącą w kącie puszkę po kawie, w której tkwiły drewniane śruby. Wyrzuciłem więc podstawkę, a blok ustawiłem na puszcze. Doskonale! (Smithsonian Institute chciał później pożyczyć od nas tę puszkę, żeby powtórzyć eksperyment, ale nie mogliśmy jej znaleźć).

Z głośników rozległo się ostrzeżenie, że za chwilę maszyna zostanie włączona i że wszyscy muszą opuścić pomieszczenie akceleratora, jeśli nie chcą się usmażyć. Popędziliśmy w górę po stromych metalowych schodach, przez parking do budynku laboratorium, gdzie przewody z detektorów są podłączone do takich elektronicznych urządzeń, jak rozmaite obwody, przeliczniki i oscyloskopy. Garwin poszedł do domu już wiele godzin przedtem, Marcel szukał czegoś do jedzenia, a ja zabrałem się do rejestrowania sygnałów elektronicznych nadchodzących z detektorów. Wielka, gruba księga laboratoryjna służyła do notowania wszystkich istotnych informacji o tym, co dzieje się w laboratorium. Była ozdobiona wesołymi napisami w rodzaju: „O kurde!”, „Kto, do diabła, zapomniał wyłączyć ekspres do kawy”, „Dzwoniła twoja żona”. Zawierała też zapis tego, co należy zrobić, tego, co zrobiono, i informacje na temat funkcjonowania urządzeń. („Uwaga na przelicznik numer 3. Czasem iskrzy i zdarza się, że źle zlicza”).

Kwadrans po godzinie 19 wiązka osiągnęła już standardowe natężenie, tarcza wytwarzająca piony została zdalnie ustawiona w odpowiednim miejscu. Natychmiast przeliczniki zaczęły rejestrować nadchodzące cząstki. Obserwowałem ten rząd przeliczników, który miał podawać liczbę elektronów emitowanych w rozmaitych odstępach czasu po zatrzymaniu mionów. Liczby wciąż były bardzo małe: 6, 13, 8...

Garwin przyjechał okolo wpół do dziesiątej. Postanowiłem przespać się trochę i zastąpić go o szóstej rano następnego dnia. Bardzo powoli jechałem do domu. Byłem na nogach od ponad dwudziestu godzin i ze zmęczenia nawet nie czułem już głodu. Zdawało mi się, że telefon zadzwonił, ledwie zdążyłem przyłożyć głowę do poduszki. Zegar wskazywał trzecią w nocy. To był Garwin: „Lepiej przyjeżdżaj, udało się!” O godzinie 3.25 zaparkowałem przed laboratorium i popędziłem do środka. Garwin kleił

wydruki z przeliczników do księgi laboratoryjnej. Liczby obezwładniały swą jednoznacznością. Ponad dwa razy więcej elektronów było emitowanych w położeniu 0° niż w położeniu 180° . Przyroda odróżnia spin prawoskrętny od lewoskrętnego. Tymczasem maszyna osiągnęła już maksymalne natężenie wiązki, wskazania przeliczników zmieniały się błyskawicznie. Przelicznik rejestrujący elektrony wyemitowane w położeniu odpowiadającym 0° pokazywał 2560, przelicznik dla 180° - 1222. Już samo statystyczne znaczenie takiej rozbieżności było przytłaczające. Wskazania przeliczników z położeń pośrednich miały zadowalająco pośrednie wartości. Implikacje niezachowania parzystości na takim poziomie były nieogarnione... Spojrzałem na Richarda. Brakowało mi tchu, serce biło mi szybko, kręciło mi się w głowie - miałem wiele z symptomów (nie wszystkie!) towarzyszących podnieceniu seksualnemu. Sprawa okazała się poważna. Zacząłem w myśli analizować, czy coś w naszym eksperymencie mogło nawalić w ten sposób, by spowodować przekłamanie danych, które nam się właśnie ukazywały. Było wiele możliwości. Spędziliśmy godzinę, sprawdzając układy używane do liczenia elektronów. Nic. Jak inaczej mogliśmy sprawdzić prawdziwość naszych wniosków?

Wtorek, godzina 4.30. Poprosiliśmy operatora o wyłączenie wiązki. Pobiegliśmy na dół i ręcznie obróciliśmy teleskop elektronowy o 90° . Jeśli wszystko jest tak, jak to sobie wyobrażamy, to otrzymany teraz rozkład również powinien przesunąć się o 90° . No i proszę! Rozkład przesunął się zgodnie z przewidywaniem.

O szóstej rano zadzwoniłem do Tsunga Dao Lee. Odezwał się już po pierwszym sygnale. „T. D., obserwowaliśmy łańcuch reakcji pion-mion-elektron, mamy teraz sygnał rzędu dwudziestu odchyleń standardowych. Parzystość jest martwa”. Ze słuchawki posypał się grad pytań: „Jaką energię miały elektrony? Jak zmieniła się obserwowana asymetria w zależności od energii elektronów? Czy spin mionów był równoległy do kierunku, z którego przybywały?” Znaliśmy odpowiedzi na niektóre z tych pytań. Pozostałe pojawiły się jeszcze tego samego dnia. Garwin zajął się rysowaniem wykresów i spisywaniem odczytów z przeliczników. Ja sporządziłem listę rzeczy, które jeszcze musimy zrobić. O siódmej zaczęliśmy otrzymywać telefony od kolegów z Uniwersytetu Columbia, którzy już usłyszeli nowinę. Garwin znikł o ósmej, zamiast niego pojawił się, chwilowo zapomniany, Marcel. O dziewiątej pokój był już zatłoczony: przyszli fizycy, technicy i sekretarki. Wszyscy próbowali dowiedzieć się, co się dzieje.

Trudno było kontynuować pracę. Moje tętno powróciło do normy. Właśnie uzyskaliśmy nową i znaczącą informację o świecie. Oblicze fizyki uległo drastycznej zmianie. Złamanie symetrii dało nam nowe potężne narzędzie badawcze: spolaryzowane miony wrażliwe na działanie pola magnetycznego, mające spiny, które można wyśledzić dzięki elektronom powstającym w wyniku rozpadu mionów. W ciągu następnych trzech, czterech godzin odebraliśmy telefony z Chicago, Kalifornii oraz z różnych europejskich ośrodków. Ludzie pracujący przy akceleratorach w Berkeley, Liverpoolu, Genewie, Moskwie pospieszyli do maszyn, niczym piloci w czasie wojny, którzy słysząc alarm pędzili do swych samolotów. Kontynuowaliśmy eksperyment i sprawdzanie naszych założeń jeszcze przez okrągły tydzień, ale piekielnie nam się spieszyło, by opublikować wyniki. Zbieraliśmy dane w różnych postaciach przez 24 godziny na dobę, sześć dni w tygodniu przez sześć miesięcy. Wkrótce inne laboratoria potwierdziły nasze wyniki.

C. S. Wu, oczywiście, nie była zachwycona naszymi czystymi, jednoznacznymi wynikami. Proponowaliśmy jej wspólne przygotowanie publikacji, ale stwierdziła, że potrzebuje jeszcze tydzień czasu na sprawdzenie swoich rezultatów.

Trudno wyrazić, jak bardzo zaskakujące były nasze wyniki dla fizyków. Rzuciliśmy wyzwanie, czy raczej ostatecznie podważyliśmy powszechnie wyznawane przekonanie, że przyroda wykazuje lustrzaną symetrię. W późniejszych latach obalono także i inne rodzaje symetrii. Ale ten pierwszy eksperyment stanowił wstrząs dla wielu teoretyków, w tym także dla Wolfganga Pauliego, który powiedział to słynne zdanie: „Nie mogę uwierzyć, by Bóg był słabym mańkutem”. Nie chodziło mu o to, że Bóg powinien być praworęczny; jeśli już, to raczej oburęczny.

Doroczne spotkanie Amerykańskiego Towarzystwa Naukowego 6 lutego 1957 roku zgromadziło w sali balowej hotelu Paramount w Nowym Jorku dwa tysiące fizyków. Ludzie zwisali z belek stropowych. Wszystkie ważniejsze gazety na pierwszych stronach zamieściły doniesienia o wynikach naszego eksperymentu. „New York Times” opublikował dosłownie i w pełnym brzmieniu tekst naszego komunikatu prasowego wraz z rysunkami cząstek i luster. Ale nic nie mogło się równać z uczuciem mistycznej euforii, którego doświadczyliśmy w ów wtorek o trzeciej nad ranem, kiedy poznaliśmy nową i głęboką prawdę.

11. A-tom!

Wczoraj trzech uczonych otrzymało Nagrodę Nobla za odkrycie najmniejszego obiektu we Wszechświecie. Okazało się, że jest to kotlet u Denny'ego.

JAY LENO, komik TV

Lata pięćdziesiąte i sześćdziesiąte były wspaniałym okresem dla nauki amerykańskiej. Zwłaszcza w porównaniu z twardymi latami dziewięćdziesiątymi. W tamtych czasach każdy, kto miał niezły pomysł i odpowiednio dużo determinacji, mógł dostać fundusze na przeprowadzenie badań. Zapewne jest to równie dobre kryterium zdrowego finansowania nauki, jak każde inne. Wciąż jeszcze czerpiemy korzyści z odkryć dokonanych w tamtym okresie.

Obfitość obiektów subjadrowych, których odkrycie umożliwiły akceleratory, była tak zaskakująca, jak bogactwo tych wszystkich ciał niebieskich, które pojawiły się w polu widzenia teleskopu. Podobnie jak w przypadku rewolucji wywołanej przez Galileusza, ludzkość zyskała nową, zupełnie nie przeczuwaną wiedzę o świecie. Jej znaczenia nie pomniejsza to, że tym razem wiedza ta dotyczyła przestrzeni atomowej, mikroświata, a nie przestrzeni kosmicznej. Można ją porównać do odkrycia przez Pasteura mikrobow i niewidocznego biologicznego wszechświata. Już nawet nie komentowano dziwnego domysłu naszego bohatera, Demokryta („Domysłu?! - słyszę jego wrzaski. - Domyślu?!?!”). Nikt nie miał już żadnej wątpliwości, że istnieje cząstka tak mała, iż umyka ludzkiej zdolności postrzegania. Zdawano sobie również sprawę z tego, że chcąc znaleźć najmniejszą cząstkę, musimy wspomagać nasze oczy różnymi przyrządami, które poprawiają ostrość obrazu: okularami, mikroskopami oraz - akceleratorami cząstek. Dzięki nim mogliśmy odkryć hadrony (mnóstwo hadronów) - cząstki o greckich imionach, które powstają w wyniku gwałtownych zderzeń wiązek w akceleratorach.

Nie oznacza to, że z radością powitano gwałtowne mnożenie się hadronów. Przyczyniły się co prawda do zlikwidowania bezrobocia i redystrybucji bogactw, tak że teraz klub zrzeszający odkrywców cząstek elementarnych nie jest już tak ekskluzywny jak przedtem. Jeśli chcesz odkryć nowy hadron, wystarczy, że poczekaś na najbliższy cykl pracy akceleratora. Na konferencji poświęconej historii fizyki, która odbyła się w Fermilabie w 1986 roku, Paul Dirac wspominał, jak trudno mu było zaakceptować konsekwencje płynące z jego równania: istnienie nowej cząstki, pozytonu, którą kilka lat później odkrył Carl Anderson. Tak radykalny sposób myślenia był sprzeczny z obowiązującym w 1927 roku etosem fizyka. Gdy znajdujący się na sali Victor Weisskopf przypomniał, że Einstein w roku 1922 rozważał możliwość istnienia dodatnio naładowanego elektronu, Dirac lekceważąco machnął ręką i powiedział: „Miał szczęście”. W roku 1930 Wolfgang Pauli stoczył rozdzierającą walkę wewnętrzną, zanim zdecydował się wysunąć hipotezę istnienia neutrina. W końcu, z wielkimi oporami zaakceptował tę cząstkę jako mniejsze zło, ponieważ zagrożona była ni mniej, ni więcej tylko zasada zachowania energii. Albo istnieje neutrina, albo trzeba odrzucić zasadę zachowania energii. To konserwatywne podejście do wprowadzania nowych cząstek nie trwało długo. Jak zauważył profesor Bob Dylan, „czasy się zmieniają”. Pionierem tej nowej filozofii był teoretyk Hi-deki Yukawa, który jako pierwszy rozpoczął proceder postulowania istnienia cząstek, by wyjaśniać nowe zjawiska.

W latach pięćdziesiątych i na początku sześćdziesiątych teoretycy byli zajęci klasyfikacją setek hadronów i poszukiwaniem jakiejś regularności w tej nowej warstwie materii. Gnębili też kolegów doświadczalników, by dostarczali im jak najwięcej danych. Odkryte setki hadronów wzbudzały zainteresowanie, lecz także przyprawiły o ból głowy. Gdzie się podziela prostota, której poszukiwaliśmy od czasów Talesa, Empedoklesa i Demokryta? Oto mieliśmy nieokielznany zwierzyniec różnych cząstek i zaczęliśmy się obawiać, że zastępy ich są nieprzeliczone.

W tej części zobaczymy wreszcie, w jaki sposób spełniło się marzenie Demokryta, Boškovića i innych. Prześledzimy historię powstawania modelu standardowego, który obejmuje wszystkie cząstki elementarne, potrzebne do utworzenia całej materii w dawnym i obecnym Wszechświecie, oraz siły oddziałujące na te cząstki. Pod pewnymi względami model standardowy jest bardziej skomplikowany od modelu Demokryta, w którym każda postać materii była zbudowana z innego rodzaju niepodzielnych a-tomów, które łączyły się ze sobą dzięki komplementarnym kształtom. W modelu standardowym cząstki materii wiążą się ze sobą za pomocą trzech różnych oddziaływań, przenoszonych przez jeszcze inne cząstki. Wszystkie te cząstki oddziałują ze sobą w skomplikowanym tańcu, który można opisać matematycznie, ale nie sposób go sobie wyobrazić. Natomiast pod innymi względami model standardowy jest znacznie prostszy niż cokolwiek, co Demokryt mógł sobie wyobrazić. Nie potrzebujemy osobnego rodzaju a-tomu na ser feta, na rzepkę w kolanie i jeszcze innego na brokoły. Istnieje tylko niewielka liczba a-tomów. Można je łączyć na różne sposoby, uzyskując wszystko! Poznaliśmy już trzy z tych a-tomów: elektron, mion i neutrino. Wkrótce zaznajomimy się z pozostałymi i zobaczymy, jak one wszystkie pasują do siebie nawzajem.

To jest triumfalna część, bo osiągamy wreszcie kres wędrówki w poszukiwaniu elementarnych cegiełek materii. Jednak w latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych nie byliśmy jeszcze tak pełni optymizmu i nadziei, że wkrótce zdołamy rozwiązać zagadkę Demokryta. Setki nowo odkrytych hadronów sprawiły, że szanse na znalezienie niewielkiej liczby cząstek elementarnych wyglądały raczej marnie. Znacznie lepiej szło fizykom opisywanie sił występujących w przyrodzie. Znano cztery wyraźnie określone rodzaje oddziaływań: grawitacyjne, elektromagnetyczne, silne jądrowe i słabe. Grawitacja - zbyt słaba, żeby można było się nią zajmować w laboratorium akceleratorowym - stanowiła domenę astrofizyki. Pominięcie tej siły miało się okazać poważnym błędem, ale pozostałe trzy oddziaływania z wolna ujarzmiliśmy.

ODDZIAŁYWANIE ELEKTRYCZNE

Lata czterdzieste to okres triumfu kwantowej teorii oddziaływania elektrycznego. Teoretyczny opis elektronu, którego dokonał Paul Dirac w roku 1927, pomyślnie łączył w sobie teorię kwantową i szczególną teorię względności. Jednak mariaż teorii kwantowej z elektromagnetyzmem był bardzo burzliwy i pełen nieporozumień.

Dążenie do zjednoczenia tych dwóch teorii nieoficjalnie nazywano Wojną z Nieokończonościami. W latach czterdziestych po jednej stronie brała w niej udział nieskończoność, po drugiej zaś byli niemal wszyscy luminarze fizyki - Pauli, Weisskopf, Heisenberg, Bethe, Dirac - oraz wschodzące gwiazdy: Richard Feynman z Cornell, Julian Schwinger z Harvardu, Freeman Dyson z Princeton i Japończyk Sin-itiro Tomonaga.

Nieskończoności, mówiąc krótko, brały się stąd, że obliczenia niektórych własności elektronów, prowadzone na gruncie relatywistycznych teorii kwantowych, dawały nieskończony wynik. Nie - wielki; po prostu nieskończony.

Matematyczną wielkość, zwaną nieskończonością, można próbować sobie uzmysłowić, przywołując w myśli wszystkie liczby całkowite i dodając do nich jeszcze jedną. Zawsze można dodać jeszcze jedną. Inny sposób, który częściej pojawiał się w obliczeniach tych genialnych, acz głęboko nieszczęśliwych teoretyków, polega na próbie określenia wartości ułamka, którego mianownik staje się zerem. Większość kieszonkowych kalkulatorów uprzejmie poinformuje Cię w takich wypadkach - zazwyczaj za pomocą serii EEEEEEE - że zrobiłeś coś głupiego. Dawniejsze, przekaźnikowe maszyny liczące wydawały z siebie zgrzytliwą kakofonię, którą najczęściej wieńczył kłęb dymu. Teoretycy przyjmują nieskończoność pojawiającą się w wyniku obliczeń jako znak, że małżeństwo teorii kwantowej z elektromagnetyzmem zostało nieprawidłowo skonsumowane - porównania tego, mimo wielkiej chęci, nie będziemy dalej rozwijać. W każdym razie Feynman, Schwinger i Tomonaga, pracując niezależnie, odnieśli swego rodzaju zwycięstwo pod koniec lat czterdziestych. Udało im się pokonać trudności związane z obliczaniem własności takich naładowanych cząstek, jak na przykład elektron.

Istotnego bodźca dla tego przełomu teoretycznego dostarczyło doświadczenie wykonane na Uniwersytecie Columbia przez jednego z moich nauczycieli, Willisa Lamba. Wkrótce po wojnie Lamb prowadził większość zaawansowanych wykładów oraz pracował nad teorią elektromagnetyzmu. Zaplanował też i przeprowadził przy użyciu techniki radarowej, opracowanej w czasie wojny na Uniwersytecie Columbia, genialnie precyzyjny eksperyment, który pozwalał badać wybrane poziomy energetyczne w atomie wodoru. Uzyskane przez Lamba dane stanowiły wyzwanie i subtelny test dla kwantowej teorii elektromagnetyzmu. Pominę szczegóły eksperymentu Lamba, chcę tylko podkreślić, że skuteczna teoria oddziaływania elektromagnetycznego narodziła się dzięki doświadczeniu.

Teoretycy stworzyli teorię zwaną zrenormalizowaną elektrodynamiką kwantową. Elektrodynamika kwantowa (w skrócie QED od angielskiego *quantum electrodynamics*) pozwoliła obliczać własności elektronu lub jego cięższego brata - mionu - z dokładnością do dziesięciu miejsc po przecinku.

Będąc teorią pola, QED umożliwiała opisanie procesu, dzięki któremu oddziaływanie przenoszone jest między dwiema cząstkami materii, powiedzmy między dwoma elektronami. Newton miał kłopoty z pojęciem oddziaływania-na-odległość, Maxwell także. Jak ono przebiega? Jeden z genialnych uczonych starożytnych, niewątpliwie kumpel Demokryta, odkrył, że Księżyc wywiera wpływ na ziemskie oceany, i łamał sobie głowę nad tym, jak ten wpływ miałby się przemieszczać w dzielącej dwa ciała pustce. W QED pole jest skwantowane, czyli podzielone na kwanty - mamy więc nowe cząstki. Nie są to jednak cząstki materii, lecz cząstki pola. Podróżując z prędkością światła, przenoszą oddziaływanie między dwiema cząstkami materii. Są to cząstki pośredniczące, które w QED nazywa się fotonami. Inne rodzaje oddziaływania mają własne, odrębne cząstki pośredniczące. One pozwalają nam uzmysłowić sobie działanie sił.

Cząstki wirtualne

Zanim ruszymy dalej, należy wyjaśnić, że cząstki przejawiają się na dwa sposoby: rzeczywisty i wirtualny. Cząstki rzeczywiste wędrują z punktu A do punktu B. Przestrzegają zasady zachowania energii. Wywołują trzaski w licznikach Geigera. Jak już wspomniałem w części Akceleratorzy..., cząstki wirtualne nie robią żadnej z tych rzeczy. Cząstki pośredniczące - nośniki oddziaływań - mogą być cząstkami rzeczywistymi, ale częściej występują w teorii w postaci wirtualnej, dlatego oba te określenia często bywają stosowane zamiennie. To właśnie cząstki pośredniczące przenoszą oddziaływanie od cząstki A do cząstki B. Jeśli wystarcza energii, rzeczywisty elektron może wyemitować rzeczywisty foton, który może wywołać rzeczywisty trzask w rzeczywistym liczniku Geigera. Cząstka wirtualna jest tworem logicznym, dozwolonym przez liberalizm fizyki kwantowej. Zgodnie z regułami kwantowymi, cząstki mogą powstawać z „pożyczonej” energii. Czas trwania pożyczki określa zasada Heisenberga, według której iloczyn pożyczonej energii i czasu trwania pożyczki musi być większy od stałej Plancka podzielonej przez 2π . Równanie wygląda tak: $\Delta E \Delta t$ jest większe od $h/2\pi$. Oznacza to, że im znaczniejsza ilość pożyczonej energii, tym krócej wirtualna cząstka może cieszyć się swym istnieniem.

W świetle tej koncepcji tak zwana próżnia może być wprost przepelniona tymi eterycznymi obiektami: wirtualne fotony, wirtualne elektrony i pozytony, kwarki i antykwarki, a nawet (z maciupieńkim prawdopodobieństwem) wirtualne piłki i anty-piłki golfowe. W tej wirującej dynamicznej próżni właściwości rzeczywistych cząstek ulegają modyfikacji. Szczęśliwie - dla zdrowia psychicznego fizyków i postępu - tak się składa, że modyfikacje te są bardzo małe. Niemniej można je zmierzyć i kiedy już wreszcie to zrozumiano, życie fizyków przerodziło się w rywalizację między coraz bardziej precyzyjnymi pomiarami i coraz bardziej skomplikowanymi i wyrafinowanymi obliczeniami teoretycznymi. Wyobraź sobie na przykład, drogi Czytelniku, rzeczywisty elektron. Wokół niego, na skutek samej jego obecności, unosi się obłoczek przelotnych, wirtualnych fotonów. Zawiadają one wszystkich razem i każdego z osobna o istnieniu elektronu, ale także wywierają wpływ na jego właściwości. Co więcej, wirtualny foton może, bardzo przelotnie, rozpuścić się na parę cząstek e^+ i e^- (elektron i pozyton). W mgnieniu komarzego oka para ponownie zlewa się w foton, ale nawet to ich efemeryczne pojawienie się wpływa na właściwości naszego elektronu.

W części piątej (Nagi atom) podałem wielkość momentu magnetycznego elektronu, wyliczoną poprzez QED i zmierzoną w pomysłowych doświadczeniach. Jak, być może, sobie przypominasz, drogi Czytelniku, te dwie liczby zgadzały się do jedenastu miejsc po przecinku. Wartości momentu magnetycznego mionu zgadzają się równie dobrze. Ponieważ mion jest cięższy od elektronu, pomiary mionu stanowią jeszcze precyzyjniejszy test prawdziwości koncepcji cząstek przenoszących oddziaływanie: nośniki emitowane przez miony mają więcej energii i mogą spowodować więcej zamieszania. W efekcie pole wywiera większy wpływ na właściwości mionu niż na właściwości elektronu. To wszystko wygląda bardzo abstrakcyjnie, ale widać, że zgodność teorii z pomiarem jest niesłychana i ukazuje nam potęgę teorii.

Osobisty magnetyzm mionu

Co do eksperymentu weryfikującego teorię... Mój pierwszy roczny urlop naukowy¹ (1958-1959) spędziłem w CERN w Genewie. Pobyt tam umożliwiły mi stypendia Forda i Guggenheima. CERN jest owocem współpracy dwunastu krajów europejskich, które wspólnie zbudowały i korzystają z kosztownego ośrodka potrzebnego do prowadzenia badań w dziedzinie fizyki wysokich energii. Założony pod koniec lat czterdziestych, gdy nad ruinami wojennymi unosiły się jeszcze dymy, ośrodek, w którym współpracowali niedawni przeciwnicy, stał się modelem dla międzynarodowej współpracy naukowej. Mój promotor i przyjaciel, Gilberto Bernardini, był dyrektorem CERN do spraw naukowych. Pojechałem głównie po to, by zwiedzić Europę, nauczyć się jeździć na nartach i przy okazji pokręcić się trochę po tym nowym laboratorium, położonym na pograniczu Szwajcarii i Francji, na przedmieściach Genewy. Spędziłem w Europie w sumie około czterech z następných dwudziestu lat, prowadząc badania w tym wspaniałym ośrodku. Można się tam porozumiewać po francusku, angielsku i niemiecku, ale oficjalnym językiem urzędowym był łamany FORTRAN. Pomocne też są rozmaite pomruki i żywa gestykulacja. Często używałem następującego porównania: CERN jest laboratorium o przepysznej kuchni i beznadziejnej architekturze, a Fermilab na odwrót. Potem przekonałem Roberta Wilsona, by zatrudnił Gabriela Tortellę, legendarnego kucharza z CERN i kierownika kafeterii, jako konsultanta w Fermilabie. CERN i Fermilab są typowymi współdziałającymi konkurentami: uwielbiają się nienawidzić.

Przy pomocy Gilberta zorganizowałem w CERN eksperyment „ g minus 2”. Jego celem było zmierzenie wartości czynnika g dla mionu z lasującą mózg dokładnością dzięki wykorzystaniu rozmaitych sztuczek. Jedna z nich polegała na tym, że miony powstające w wyniku rozpadu pionów są spolaryzowane: większość z nich ma spiny wskazujące w tę samą stronę względem ich kierunku ruchu. Inna sprytna sztuczka kryje się w tytule eksperymentu: „ g minus dwa”, czy - jak mawiają Francuzi - *ży moins deux*. Wartość czynnika g jest związana z siłą maleńkiego magnesika wbudowanego w każdą wirującą cząstkę obdarzoną ładunkiem elektrycznym, jak elektron lub mion.

Wiedz, drogi Czytelniku, że „surowa” teoria Diraca przewidywała, iż wartość czynnika g wynosi dokładnie 2,0. Jednak, w miarę krystalizowania się QED, okazało się, że konieczne było wprowadzenie niewielkich, choć istotnych poprawek do tej wielkości, ponieważ mion czy elektron „odczuwa” kwantowe pulsowanie otaczającego go pola. Przypomnijmy sobie, że naładowana cząstka może wyemitować wirtualny foton. Ten foton, jak widzieliśmy, może rozpuścić się - tylko na mgnienie oka - na parę przeciwnie naładowanych cząstek i powrócić do swego pierwotnego stanu, zanim ktokolwiek się zorientuje. Na samotny elektron zawieszony w próżni oddziałuje wirtualny foton, wpływa nań wirtualna para, obracają nim przelotne siły magnetyczne. Te i inne, nawet jeszcze subtelniejsze, procesy zachodzące w wirtualnym rosołku wirtualnych zdarzeń subtelnie łączą elektron ze wszystkimi innymi naładowanymi cząstkami istniejącymi we Wszechświecie. Na skutek tego własności elektronu ulegają modyfikacji. W dziwnym języku fizyki teoretycznej mówi się, że „goły” elektron, odcięty od wszelkich wpływów pola, jest obiektem wyimaginowanym, a „ubrany” nosi na sobie piętno Wszechświata. Kryje się ono w niezmiernie małych poprawkach do gołych własności.

W części Nagi atom opisałem czynnik g elektronu. Teoretycy bardziej interesowali się mionem: jest on ponad dwieście razy cięższy od elektronu, dlatego może emitować wirtualne fotony, sięgające dalej i uczestniczące w bardziej egzotycznych procesach.

¹ Tzw. *sabbatical year* - roczny urlop udzielany pracownikom naukowym, podczas którego pracują poza macierzystą uczelnią (przyp. tłum.).

W rezultacie wielu lat pracy pewien teoretyk podał następującą wartość momentu magnetycznego mionu:

$$g = 2(1,001165918).$$

Ten wynik, osiągnięty w roku 1987, był punktem kulminacyjnym długiego łańcucha obliczeń przeprowadzonych według nowych wersji teorii QED, sformułowanych przez Feynmana i innych. Zbiór wyrażeń, które w sumie dają liczbę 0,001165918, znany jest pod nazwą poprawek radiacyjnych. Pewnego razu słuchaliśmy wykładu Abrahama Paisa poświęconego tymże poprawkom radiacyjnym, gdy do sali wkroczył cieć uzbrojony w klucz francuski. Pais zapytał go, czego sobie życzy, na co któryś ze słuchaczy zawołał: „Bram, on chyba przyszedł poprawić radiator”.

Jak doświadczenie może dorównać teorii? Cała sztuczka polegała na tym, żeby zmierzyć wielkość odchylenia czynnika g mionu od liczby 2,0 tak, aby bezpośrednio otrzymać wartość poprawki (0,001165918), a nie maciupęńki dodatek do wielkiej liczby. Wyobraź sobie, drogi Czytelniku, próbę zważenia monety, podczas której najpierw ważysz osobę z monetą w kieszeni, a potem tę samą osobę już bez monety i odejmujesz otrzymane wyniki. Lepiej zważyć samą monetę. Przypuśćmy, że uwięzimy mion na orbicie w polu magnetycznym. Ładunek krążący na orbicie jest także magnesem o pewnej określonej wartości czynnika g , która zgodnie z teorią Maxwella wynosi dokładnie 2,0, podczas gdy wartość g dla magnesu związanego ze spinem ma pewną maciupęńką nadwyżkę ponad 2. Tak więc mion ma dwa różne magnesy: wewnętrzny (związany ze spinem) i zewnętrzny (związany z orbitą). Gdy mierzymy spinowy magnes mionu znajdującego się na orbicie, otrzymujemy wypadkową tych czynników, czyli odchylenie od 2, choćby nawet było bardzo małe.

Wyobraźmy sobie małą strzałkę (oś spinu mionu) poruszającą się po wielkim okręgu w ten sposób, że zawsze jest do niego styczna. Odpowiada to sytuacji, w której g równa się dokładnie 2. Niezależnie od tego, ile okrążeń wykona cząstka, oś spinu zawsze byłaby styczna do orbity. Jeśli jednak rzeczywista wartość czynnika g choćby minimalnie różni się od liczby 2,0, to strzałka (oś spinu) odchyli się podczas każdego okrążeń od kierunku stycznego do orbity przynajmniej o maleńką część stopnia. Po, powiedzmy, 250 okrążeniach strzałka może już wskazywać ku środkowi okręgu, wzdłuż promienia. Jeśli będziemy kontynuować ten ruch po orbicie, po 1000 okrążeń strzałka zatoczy pełne koło (360°) i wróci do swego początkowego, stycznego położenia. Dzięki niezachowaniu parzystości możemy (z triumfem) określić kierunek strzałki (spinu mionu), znając kierunek, w którym emitowane są elektrony w procesie rozpadu mionów. Kąt między osią spinu a linią styczną do orbity stanowi miarę różnicy między czynnikiem g a liczbą dwa. Precyzyjny pomiar tego kąta jest więc precyzyjnym pomiarem różnicy. Jasne? Nie? No cóż, musisz mi, drogi Czytelniku, uwierzyć na słowo!

Zapowiadało się, że proponowany eksperyment będzie trudny i ambitny, ale w 1958 roku łatwo było skrzyknąć zdolnych młodych fizyków do pomocy. Wróciłem do Stanów Zjednoczonych w połowie 1959 roku i od czasu do czasu odwiedzałem CERN, żeby zobaczyć, jak przebiega eksperyment. Odbyszał się on w kilku fazach; zakończył się dopiero w 1978 roku, kiedy wreszcie opublikowano ostateczną otrzymaną w CERN wartość czynnika g dla mionu - triumf eksperymentatorskiej przemyślności i determinacji (Niemcy mają na to określenie *sitzfleisch*). Wartość g dla elektronu podana była z większą dokładnością, ale nie zapominajmy, że elektrony są trwałe, a miony pozostają w świecie tylko przez dwie milionowe części sekundy. Rezultat?

$$g = 2(1,001165923 \pm 0,00000008).$$

Błąd wielkości ośmiu części na sto milionów znakomicie mieści się w granicach teoretycznych przewidywań.

Wszystko to ma Cię przekonać, drogi Czytelniku, że QED jest wspaniałą teorią i dlatego też, między innymi, uważa się, że Feynman, Schwinger i Tomonaga są wielkimi fizykami. Teoria ta ma wszakże pewne tajemnicze zakamarki, z których jednemu warto się bliżej przyjrzeć, bo ma znaczenie dla poruszanego przez nas zagadnienia. Chodzi o nieskończoności, na przykład o masę elektronu. Pierwsze próby obliczenia masy punktowego elektronu na podstawie kwantowej teorii pola kończyły się trudnym do zaakceptowania wynikiem: nieskończenie ciężki. To tak, jakby św. Mikołaj produkujący elektrony w swoim warsztacie musiał wcisnąć pewną ilość ujemnego ładunku do bardzo małej objętości. Wymaga to strasznej pracy! Ten wysiłek powinien przejawiać się w postaci ogromnej masy, ale elektron ważący 0,511 MeV, czyli około 10^{-30} kg, jest leciutki, najlżejszy ze wszystkich cząstek o niezerowej masie.

Feynman i jego koledzy zaproponowali, aby gdy tylko pojawia się na horyzoncie ta okropna nieskończoność, omijać ją wstawiając do równania znaną wartość masy elektronu. W normalnym świecie taki postępek określa się jako oszustwo, ale w świecie teorii nazywa się to renormalizacją - spójną matematycznie metodą, pozwalającą na przechytrzenie tych żenujących nieskończoności, które są nie do przyjęcia dla żadnej szanującej się teorii. Nie martw się, drogi Czytelniku, to rozwiązanie działa i pozwala wykonywać superdokładne obliczenia, o których mówiliśmy. Tym oto sposobem ominięto problem masy, choć go nie rozwiązano. Pozostał za nami, jak cichutko tykająca bomba zegarowa, którą zdetonuje Boska Cząstka.

ODDZIAŁYWANIE SŁABE

Jedna z tajemnic, która dręczyła Rutherforda i innych, dotyczyła radioaktywności. Jak to się dzieje, że jądra i cząstki rozpadają się ni stąd, ni zowąd na inne cząstki? Enrico Fermi w latach trzydziestych jako pierwszy skonstruował teorię, która starała się opisać to zjawisko.

O geniuszu Fermiego opowiadano wielokrotnie. Podczas pierwszego próbnego wybuchu bomby atomowej w Alamogordo, w stanie Nowy Meksyk, Fermi leżał na ziemi w odległości około 15 kilometrów od miejsca eksplozji. Zaraz po wybuchu bomby Fermi wstał i rzucił na ziemię skrawki papieru. Papierki upadły u jego stóp w spokojnym powietrzu, ale parę sekund później nadeszła fala uderzeniowa i przesunęła je o kilka centymetrów. Fermi obliczył moc eksplozji na podstawie wielkości tego przesunięcia. Wartość, którą otrzymał tam, na miejscu, zgadzała się dokładnie z oficjalnymi obliczeniami, które zajęły kilka dni. (Przyjaciel Fermiego, Emilio Segré, zauważył jednak, że Fermi był człowiekiem, gdyż miał kłopoty z kontrolowaniem wydatków Wydziału Fizyki Uniwersytetu w Chicago).

Podobnie jak wielu innych fizyków, Fermi uwielbiał wymyślać łamigłówki matematyczne. Allan Wattenberg opowiadał, że kiedy pewnego razu jadł *lunch* z grupą fizyków, Fermi dostrzegł kurz na szybach okiennych i rzucił wszystkim wyzwanie, by spróbowali obliczyć, jak gruba musiałaby być jego warstwa, aby zaczął pod własnym ciężarem odpadać od szyby. Fermi pomagał wszystkim przebrnąć przez to zadanie, które należało rozpocząć wychodząc od podstawowych stałych fizycznych, uwzględnić oddziaływanie elektromagnetyczne, by w końcu obliczyć przyciąganie między dielektrykami, które

sprawia, że cząstki izolatora przylegają do siebie. W trakcie realizowania projektu Manhattan¹ w Los Alamos pewien fizyk przejechał kojota. Fermi stwierdził, że można obliczyć całkowitą liczbę kojotów zamieszkujących pustynię na podstawie obserwacji częstotliwości oddziaływań kojotów z samochodami. Można je porównać do zderzeń między cząstkami: kilka rzadkich wydarzeń pozwala wyciągnąć wnioski dotyczące całej populacji cząstek.

No cóż, Fermi był piekielnie zdolny i cieszył się ogromnym uznaniem. Imienia żadnego innego fizyka nie wykorzystywano tak często. Policzmy... Mamy Fermilab, Instytut im. Enrico Fermiego, fermiony (wszystkie kwarki i leptony) i statystykę Fermiego (mniejsza z tym); fermi to jednostka długości równa 10^{-15} metra. Jest moim największym marzeniem, by pozostawić po sobie choć jedną rzecz, nazwaną na moją cześć. Błagałem kolegę z Uniwersytetu Columbia, T. D. Lee, by przewidział istnienie cząstki, którą po odkryciu można by nazwać Lee-on. Na próżno.

Jednak Fermi poza swą pracą nad pierwszym reaktorem jądrowym, umiejscowionym pod stadionem uniwersyteckim w Chicago, poza pionierskimi badaniami poświęconymi rozkwaszonym kojotom, dokonał jeszcze czegoś, co miało większe znaczenie dla naszego zrozumienia Wszechświata. Fermi opisał nową siłę przyrody - oddziaływanie słabe.

Wróćmy na chwilę do Becquerela i Rutherforda. Przypomnij sobie, drogi Czytelniku, że Becquerel przypadkowo odkrył radioaktywność w roku 1846, kiedy przechowywał nieco uranu w tej samej szufladzie, w której trzymał papier fotograficzny. W końcu wykrył przyczynę zaczernienia papieru: stwierdził, że stało się to za sprawą niewidocznych promieni wysyłanych przez uran. Po odkryciu promieniowania i po tym, jak Rutherford opisał trzy jego rodzaje - α , β i γ wielu fizyków z całego świata skupiło swą uwagę na cząstkach β , które wkrótce zostały zidentyfikowane jako elektrony.

Skąd się brały te elektrony? Fizycy szybko doszli do wniosku, że były emitowane przez jądro, gdy ulegało ono spontanicznej przemianie. W latach trzydziestych stwierdzono, że jądra składają się z neutronów i protonów, i wykryto związek łączący radioaktywność z nietrwałością części składowych jądra. Oczywiście, nie wszystkie jądra są nietrwałe. Zasada zachowania energii i oddziaływanie słabe w sposób istotny decydują o tym, czy proton lub neutron rozpadnie się w jądrze.

Pod koniec lat dwudziestych prowadzono staranne pomiary radioaktywnych jąder przed rozpadem i po nim. Mierzono masę jądra na początku, masę jądra powstałego w wyniku przemiany oraz masę i energię wyemitowanego elektronu (pamiętając, że $E = mc^2$). Dzięki temu dokonano istotnego odkrycia: energia po przemianie nie była równa energii sprzed przemiany. Brakowało energii. Na początku było jej więcej niż na końcu. Wolfgang Pauli wyraził wtedy śmiało (jak na owe czasy) hipotezę, że niewielki, elektrycznie obojętny obiekt unosi ze sobą brakującą energię.

W roku 1933 Enrico Fermi złożył to wszystko w jedną całość. Elektrony pochodziły z jądra, ale nie bezpośrednio. Neutron w jądrze rozpada się na proton, elektron i mały neutralny obiekt, wynaleziony przez Pauliego. Fermi ochrzcił go neutrinem, co oznacza właśnie „mały i neutralny”. Za tę reakcję jądrową odpowiedzialna jest jakaś siła i Fermi nazwał ją oddziaływaniem słabym. Jest ona niezmiernie wątką w porównaniu z silnym oddziaływaniem jądrowym lub siłą elektromagnetyczną. Na przykład przy niskich ener-

¹ Taki kryptonim nosił amerykański program budowy bomby atomowej (przyp. tłum.).

giach oddziaływanie słabe jest około tysiąca razy słabsze niż oddziaływanie elektromagnetyczne.

W latach trzydziestych nie można było bezpośrednio wykryć neutrina, które nie ma ładunku i prawie żadnej masy, a i teraz można je rejestrować tylko z wielkim trudem. Choć aż do lat pięćdziesiątych nie potrafiiono eksperymentalnie udowodnić istnienia neutrina, większość fizyków uznawała je, ponieważ po prostu musiało ono istnieć, aby w księgowości panował porządek. We współczesnych, bardziej egzotycznych reakcjach zachodzących w akceleratorach, w których biorą udział kwarki i różne inne dziwne rzeczy, wciąż przyjmujemy, że wszelka brakująca energia odlatuje z rejonu zderzenia w postaci niewykrywalnych neutrin. Ten zręczny, mały spryciarz zdaje się zostawiać swoje niewidzialne ślady w całym Wszechświecie.

Ale wróćmy z powrotem do oddziaływania słabego. Rozpad opisany przez Fermiego - neutron ustępuje miejsca protonowi, elektronowi i neutrinu (tak naprawdę to antyneutrinu) - przydarza się nieustannie swobodnym neutronom. Kiedy jednak neutron związany jest w jądrze, może się to zdarzyć tylko w określonych warunkach. Z kolei proton (o ile wiemy) nie potrafi się rozpaść, jeśli jest cząstką swobodną, ale związany w zatłoczonym jądrze może dać początek neutronowi, pozytonowi i neutrinu. Słaby rozpad swobodnego neutronu jest możliwy dzięki zwykłej zasadzie zachowania energii. Neutron jest cięższy od protonu, dlatego kiedy swobodny neutron zmienia się w proton, pozostaje jeszcze dość dodatkowej energii z masy spoczynkowej na to, aby stworzyć elektron oraz antyneutrino i aby posłać je w świat z niewielką ilością energii. Swobodny proton ma na to za mało energii. Jednak wewnątrz jądra obecność innych towarzyszy zmienia masę związanej cząstki. Jeśli protony i neutrony związane wewnątrz jądra mogą za pośrednictwem procesu rozpadu zwiększyć trwałość i zmniejszyć masę jądra, w którym tkwią, to czynią to. Jeżeli jednak jądro znajduje się już w najniższym stanie masowo-energetycznym, to jest ono trwałe i nic się nie dzieje. Okazuje się, że wszystkie hadrony - protony, neutrony i setki ich kuzynów - ulegają rozpadowi za sprawą oddziaływania słabego. Wygląda na to, że swobodny proton stanowi jedyny wyjątek od tej reguły.

Teoria oddziaływania słabego została stopniowo uogólniona i w wyniku nieustannego konfrontowania z nowymi danymi przekształciła się w kwantową teorię pola oddziaływania słabego. Do ukształtowania tej teorii przyczyniło się nowe pokolenie teoretyków, wywodzących się głównie z amerykańskich uniwersytetów: Feynman, Gell-Mann, Lee, Young, Schwinger, Robert Marshak i wielu innych. (Wciąż prześladuje mnie koszmarne sen, w którym wszyscy teoretycy nie wymienieni przeze mnie z nazwiska spotykają się na przedmieściach Teheranu i obiecują natychmiastowe przyjęcie do Teoretycznego Raju temu, kto szybko i całkowicie zrenormalizuje Ledermana).

Lekko złamana symetria, czyli skąd się wzięliśmy

Istotną własnością oddziaływania słabego jest niezachowanie parzystości.¹ Wszystkie inne siły respektują tę symetrię, dlatego tak szokujące było odkrycie, że jedna tego nie robi. W tych samych eksperymentach wykazano, że również inna głęboka symetria - ta,

¹ Zwanej symetrią *P* od angielskiego terminu *parity* (przyp. tłum.).

która pozwala na porównanie świata z antyświatem - nie jest zachowana. Ta druga symetria zwana jest symetrią C . Symetria C także bywa nie zachowana jedynie w oddziaływaniach słabych. Zanim to wykazano, uważano, że w świecie zbudowanym z antymaterii obowiązywałyby te same prawa, które rządzą w zwykłym, materialnym świecie. Nasze dane jednak temu przeczą, gdyż wiadomo już, że oddziaływanie słabe nie respektuje tej symetrii.

Cóż mieli zrobić teoretycy? Szybko odwołali się do nowej symetrii, będącej złożeniem dwóch poprzednich: symetrii CP . Według niej dwa układy fizyczne są w istocie takie same, jeśli jeden jest związany z drugim poprzez jednoczesne odbicie lustrzane (P) i zmianę cząstki na antycząstkę (C). Symetria CP , mówili teoretycy, jest znacznie głębszą symetrią, nawet jeśli przyroda nie zachowuje symetrii C i P z osobna, to złożenie CP musi być respektowane. I było aż do roku 1964, kiedy Val Fitch i James Cronin, eksperymetatorzy z Princeton zajmujący się badaniami neutralnych kaonów (cząstek, które zostały odkryte przez moją grupę w Brookhaven w doświadczeniach przeprowadzonych w latach 1956-1958), natrafili na wyraźne i przekonujące dane, zgodne z którymi symetria CP w rzeczywistości nie jest doskonała.

Niedoskonała? Teoretycy się naburmuszyli, ale rozradował się artysta, tkwiący w każdym z nas. Artyści i architekci uwielbiają raczyć nas dziełami, które są prawie, acz niezupełnie symetryczne. Asymetryczne wieże symetrycznej skądinąd katedry w Chartres są dobrym tego wykładem. Efekty złamania symetrii CP były małe - w kilku przypadkach na tysiąc - ale wyraźne, i teoretycy znaleźli się w punkcie wyjścia.

Mam trzy powody, by wspominać tu o niezachowaniu symetrii CP . Po pierwsze, stanowi ona dobry przykład tego, co zostało rozpoznane także i w innych rodzajach oddziaływań jako „nieznacznie nie zachowana symetria”. Jeśli wierzymy w istnienie głębokiej, wewnętrznej symetrii rządzącej przyrodą, to okazuje się, że $COŚ$, jakiś fizyczny czynnik musi działać i ją naruszać. Blisko spokrewniony z tym czynnikiem jest mechanizm, który nie niszczy właściwie symetrii, lecz ukrywa ją tak, że przyroda wydaje się asymetryczna. To Boska Cząstka skrywa przed nami symetrię. Wrócimy do tego w rozdziale ósmym. Drugim powodem, dla którego wspominam o niezachowaniu symetrii CP , jest to, że w latach dziewięćdziesiątych zrozumienie tego pojęcia stało się jedną z najpilniejszych potrzeb, jeśli mamy pozbyć się problemów związanych z modelem standardowym.

Ostatnim powodem - który zresztą zwrócił na eksperyment Fitcha i Cronina uwagę Królewskiej Szwedzkiej Akademii Nauk - jest to, że uwzględnienie niezachowania symetrii CP w kosmologicznych modelach ewolucji Wszechświata doprowadziło do rozwiązania zagadki, która prześladowała astrofizyków przez pięćdziesiąt lat. Przed rokiem 1957 wielka liczba eksperymentów wskazywała na doskonałą symetrię między materią i antymaterią. Jeśli tak, to dlaczego nasza planeta, Układ Słoneczny, Galaktyka i - na co wskazują liczne dane - wszystkie inne galaktyki są pozbawione antymaterii? I jak eksperyment przeprowadzony w roku 1957 na Long Island może to wszystko wyjaśnić?

Proponowane modele mówiły, że w miarę jak Wszechświat stygł po Wielkim Wybuchu, wszelka materia i antymateria uległy anihilacji, pozostawiając po sobie czyste promieniowanie, zbyt chłodne - o za małej energii - aby mogła z niego powstać materia. Ale materia to przecież my! Skąd się wzięliśmy? Eksperyment Fitcha-Cronina wskazuje wyjście z tej sytuacji. Symetria nie jest doskonała. Nieznaczny nadmiar materii nad antymaterią (na każde sto milionów par kwark-antykwarok przypada jeden dodatkowy kwark) to wynik nieznacznego niezachowania symetrii CP i ten nadmiar pozwala wyja-

śnić istnienie całej materii w obecnym Wszechświecie, w tym także i nasze istnienie. Dzięki, panie Fitch, dzięki, panie Cronin. Wspaniali z was faceci.

Polowanie na małe neutralne

Znaczna część szczegółowych informacji na temat słabego oddziaływania pochodziła z badań wiązek neutrin; i tu rozpoczyna się zupełnie nowa historia. Hipotezę Pauliego z 1930 roku - o istnieniu małej neutralnej cząstki, która podlega wyłącznie oddziaływaniom słabym - sprawdzano na wiele sposobów w latach 1930-1960. Precyzyjne pomiary coraz większej liczby jąder podlegających słabym rozpadom wskazywały na prawdziwość hipotezy, że coś malutkiego i pozbawionego ładunku elektrycznego umyka z miejsca zderzenia, unosząc ze sobą energię i pęd. Był to wygodny sposób opisywania reakcji rozpadu, ale czy można wykryć istnienie neutrino?

To było niełatwe zadanie. Neutrino szybują nie naruszone przez ogromne przestrzenie materii, gdyż podlegają jedynie oddziaływaniom słabym, których niewielki zasięg znacznie redukuje prawdopodobieństwo zderzenia. Oceniono, że aby mieć pewność, iż neutrino zderzy się z cząstką materii, trzeba by dysponować ołowianą tarczą o grubości roku świetlnego! Byłby to dość kosztowny eksperyment. Jeśli jednak użyjemy dostatecznie wielkiej liczby neutrin, to grubość tarczy niezbędnej do tego, aby od czasu do czasu zaobserwować zderzenie, odpowiednio się zmniejszy.

W połowie lat pięćdziesiątych używano reaktorów jądrowych jako intensywnych źródeł neutrin, na których działanie wystawiano wielką kładź zawierającą dwuchlorek kadmu (było to rozwiązanie tańsze niż płyta ołowiu o grubości kilku lat świetlnych). Przy tak wielkiej liczbie neutrin (tak naprawdę to antyneutrin, bo to właśnie one powstają w reaktorach) nieuniknione było, aby niektóre z nich uderzyły w protony, powodując odwrotny rozpad β , to znaczy taki, w którym uwolniony zostaje pozyton i neutron. Wędrujący pozyton w końcu spotyka elektron; następuje anihilacja, w wyniku której powstają dwa fotony odlatujące w przeciwnych kierunkach. Fotony te wylatują na zewnątrz do ciekłego scyntylatora, w którym pojawiają się błyski, gdy fotony weń uderzają. Wykrycie neutronu i pary fotonów stanowiło pierwszy eksperymentalny dowód świadczący o istnieniu neutrino. Było to 35 lat po tym, jak Pauli wymyślił tę kreaturę.

W roku 1959 kolejny kryzys - a nawet dwa - zaczął gnębić fizyków. Ośrodkiem całego zamieszania stał się Uniwersytet Columbia, ale w końcu kryzysem podzielono się sprawiedliwie i rozszedł się szerokim echem po całym świecie. Do tego czasu wszystkie dane dotyczące oddziaływania słabego były uprzejmie dostarczane przez naturalnie rozpadające się cząstki. Cząstka nigdy nie odczuwa większej rozkoszy niż wtedy, gdy swoje życie oddaje dla oświecenia fizyków.

Aby badać słabe oddziaływania, po prostu obserwowaliśmy takie cząstki, jak neutron czy pion, gdy rozpadały się na inne cząstki. Zaangażowane w to energie pochodziły z masy spoczynkowej rozpadających się cząstek: zazwyczaj od kilku do około stu MeV. Nawet w wypadku swobodnych neutrin wypadających z reaktorów i biorących udział w słabych zderzeniach w grę wchodziła energia nie przekraczająca kilku MeV. Po zmodyfikowaniu teorii oddziaływań słabych tak, aby potwierdziła dane doświadczalne dotyczące niezachowania symetrii lustrzanej, okazało się, że mamy fantastyczną, elegancką teorię zgodną ze wszystkimi dostępnymi danymi, jakich dostarczyły miliony

rozpadających się jąder, a także rozpady pionów, mionów, lambd oraz najprawdopodobniej - choć to trudniej udowodnić - rozpad cywilizacji zachodniej.

Wybuchowe równanie

Kryzys numer jeden był związany z matematycznym opisem oddziaływania słabego. W równaniach występuje energia, przy której mierzy się oddziaływanie. W zależności od danych, do równania należy wstawić spoczynkową masę rozpadającej się cząstki - 1,65 MeV albo 37,2 MeV, albo cokolwiek - i wychodzi właściwy rezultat. Należy pomanipulować wyrażeniami równania, potrząsnąć, utrzyć i wcześniej czy później posypią się przewidywania dotyczące czasu życia, produktów rozpadu, widma energii elektronów - rzeczy, które można porównywać z wynikiem doświadczenia - i będą one trafne. Ale jeśli do równania wstawić jako masę spoczynkową, powiedzmy, 100 GeV (sto miliardów elektronowoltów), teoria wariuje. Równanie eksploduje prosto w nos. W żargonie fizyków sytuację tę nazywa się „kryzysem unitarności”.

Oto nasz dylemat: równanie jest zupełnie dobre, ale wykazuje skłonności patologiczne przy wysokich energiach. Małe liczby dobrze działają, ale duże nie. Nie posiadamy więc prawdy ostatecznej, tylko prawdę cząstkową, dotyczącą niewielkich energii. Musi istnieć jakaś nowa fizyka, która modyfikuje równania przy wysokich energiach.

Za kryzys numer dwa była odpowiedzialna pewna nie obserwowana reakcja. Można obliczyć, jak często mion rozpada się na elektron i foton. Teoria słabych oddziaływań mówiła, że rozpad taki powinien się zdarzać. Szukanie tej reakcji było ulubionym eksperymentem w Nevis. Wielu młodych doktorów spędziło w Nevis Bóg-wie-ile wiązkgodzin na bezowocnych poszukiwaniach. Murray Gell-Mann, mędrzec, który posiadał wiedzę tajemną, często bywa cytowany jako autor tak zwanej totalitarnej zasady fizyki: „Wszystko, co nie jest zakazane, jest obowiązkowe”. Jeśli prawa przyrody nie wykluczają jakichś procesów, to one nie tylko mogą, ale muszą zachodzić! A skoro rozpad mionu na elektron i foton nie jest zakazany, to dlaczego nigdy nie udało się nam go zaobserwować? Co, do licha, uniemożliwiało rozpad mion-elektron- γ ? (Czytając γ miej na myśli foton).

Oba kryzysy były niezwykle fascynujące. Oba otwierały możliwość odkrycia nowych praw fizyki. Pojawiały się rozliczne spekulacje teoretyczne, ale w eksperymentatorach wrzała krew. Co robić? My doświadczalnicy musimy mierzyć, tłuc młotem, piłować, ciąć, układać ołowiane cegły - jednym słowem: coś robić. No i zrobiliśmy.

Zbrodnicza spółka i dwuneutrinowy eksperyment

W listopadzie roku 1959 Melwinowi Schwartzowi, wykładowcy z Uniwersytetu Columbia, po wysłuchaniu szczegółowego omówienia kłopotów, z jakimi borykał się teoretyk T. D. Lee (z tegoż samego uniwersytetu) przyszedł do głowy WSPANIAŁY POMYSŁ. Można utworzyć wiązkę neutrin, pozwalając wysokoenergetycznej wiązce pionów szybować tak długo, aż pewna ich część, powiedzmy 10 procent, ulegnie rozpadowi na miony i neutrina. Piony zanikałyby podczas lotu, a na ich miejsce pojawiałyby się miony i neutrina. Mamy więc mknące w przestrzeni miony i neutrina, które pochodzą z dziesięciu procent pionów, pozostałe 90 procent pionów, które jeszcze nie uległy rozpadowi, oraz

garść odłamków jądrowych pochodzących z tarczy, w której powstawały piony. Teraz, rzekł Schwartz, skierujmy naszą wiązkę na stalową ścianę grubości około 13 metrów (jak się okazało). W ścianie tej zatrzymałoby się wszystko, oprócz neutrin, które bez kłopotu mogłyby przeniknąć nawet przez 13 milionów metrów stali. Po drugiej stronie stalowej ściany będziemy mieli czystą wiązkę neutrin, a ponieważ podlegają one tylko oddziaływaniu słabemu, dadzą nam wspaniałą okazję do badania własności zarówno neutrin, jak i słabego oddziaływania.

Ten projekt odnosił się do obu kłopotliwych zagadnień. W pomysłach Mela chodziło o to, że dzięki tej wiązce można by badać oddziaływanie słabe o energii miliardów zamiast milionów elektronowoltów. Dzięki temu poznalibyśmy zachowanie tej siły przy wysokich energiach. Wiązka mogłaby także dostarczyć wskazówek, dlaczego nie obserwujemy rozpadów mionów na elektron i foton; przy założeniu, że neutrina są w to w jakiś sposób zamieszane.

Jak to się często zdarza w nauce, niemal identyczna koncepcja została opublikowana w tym samym czasie przez radzieckiego fizyka Brunona Pontecorvo. Jeśli ci się zdaje, drogi Czytelniku, że nazwisko to brzmi z włoska, to masz rację: Bruno Pontecorvo był Włochem, który w latach pięćdziesiątych zbiegł do Moskwy z powodów politycznych. Jego styl uprawiania nauki, pomysły i wyobrażenia były wyjątkowe. Tragedia Brunona polegała na tym, że próbował realizować swoje fantastyczne pomysły w systemie obywatelskiej biurokracji. Międzynarodowe konferencje stanowią dobrą okazję do wyrażania i zacieśniania przyjacielskich więzów między naukowcami. W czasie jednej z takich konferencji, odbywającej się w Moskwie, zapytałem przyjaciela: „Jewgienij, powiedz mi, który z was, rosyjskich uczonych, jest prawdziwym komunistą?” Rozejrzał się po sali i wskazał na Pontecorvo. Ale to było już w 1960 roku.

W roku 1959 wróciłem z pięcioletniego pobytu w CERN. Wysłuchałem dyskusji dotyczącej kryzysu związanego ze słabym oddziaływaniem i dowiedziałem się o propozycji Schwartza. Z jakiegoś powodu doszedł on do wniosku, że żaden z istniejących dotąd akceleratorów nie miał dostatecznie dużej mocy, aby uformować odpowiednio intensywną wiązkę neutrin, z czym ja się nie zgodziłem. W Brookhaven kończono właśnie budowę akceleratora AGS (Alternating Gradient Synchrotron) o mocy 30 GeV. Przeprowadziłem odpowiednie obliczenia i przekonałem siebie, a potem Schwartz, że eksperyment będzie można przeprowadzić. Zaprojektowaliśmy więc ogromny jak na owe czasy eksperyment. Jack Steinberger, kolega z Uniwersytetu Columbia, dołączył do nas i razem ze studentami i stażystami utworzyliśmy siedmioosobową grupę. Jack, Mel i ja znani byliśmy z delikatności i łagodności. Pewnego razu, gdy szliśmy razem w Brookhaven, usłyszałem, jak ktoś z grupy fizyków zawołał: „O, idzie zbrodnicza spółka!”

Aby zablokować wszystkie cząstki oprócz neutrin, zbudowaliśmy wokół ogromnego detektora grubą ścianę z tysięcy ton stali pozyskanej z przestarzałych i złomowanych okrętów marynarki wojennej. Kiedyś przez pomyłkę powiedziałem jakiemuś dziennikarzowi, że dla zrobienia naszej ściany rozmontowaliśmy okręt wojenny *Missouri*. Musiałem pomylić nazwy, bo najwyraźniej *Missouri* gdzieś tam jeszcze wciąż pływa, ale z pewnością pocięliśmy jakiś inny złomowany okręt. Miałem też nieszczęście zażartować, że gdyby zaczęła się jakaś wojna, musielibyśmy rozmontować naszą ścianę i z powrotem zlepić z kawałków ten statek. W ten sposób wkrótce rozeszła się plotka, że marynarka wojenna skonfiskowała nasze urządzenia, by je wykorzystać w jakiejś wojnie. Jakiej - mieliśmy wówczas rok 1960 - pozostaje zagadką.

Inna z lekka podkoloryzowana historia dotyczy działa artyleryjskiego. Dostaliśmy dwunastocalowe działko okrętowe o odpowiednim otworze i grubych ścianach. Wspinał się nadawało na kolimator - urządzenie służące do skupiania i nakierowywania wiązki cząstek. Chcieliśmy wypełnić je berylem, który miał służyć jako filtr, ale wewnątrz lufy zostały nagwintowane głębokie rowki. Posłałem więc chudego doktoranta do środka, by pozapychał je stalową watą. Popracował tam godzinę, po czym wyszedł spocony i zły i powiedział: „Mam tego dość, rezygnuję”. „Nie możesz - zawołałem. - Skąd wezmę drugiego studenta tego kalibru?”

Gdy już zakończyliśmy przygotowania, stal ze złomowanych okrętów otaczała detektor, który został sporządzony z dziesięciu ton aluminium rozmieszczonego gustownie w ten sposób, że można było zaobserwować produkty zderzenia między neutrinem a jądrem aluminium. Detektorem, którego ostatecznie użyliśmy, była komora iskrowa wynaleziona przez Japończyka, Shuji Fukui. Wiele nauczyliśmy się podczas dyskusji z Jimem Croninem z Princeton, który opanował technikę posługiwania się tym urządzeniem. Następnie Schwartz zwyciężył w konkursie na najlepszy projekt komory, który mógł być przeskalowany od kilku kilogramów do dziesięciu ton. W komorze tej starannie wykonane płytki z aluminium grubości około 2,5 centymetra zostały rozmieszczone w odległości nieco ponad jeden centymetr od siebie, a sąsiadujące ze sobą płytki miały ogromną różnicę potencjału. Jeśli naładowana cząstka mijała szczelinę, to jej tropem podążała iskra i można było zrobić jej zdjęcie. Jak to łatwo powiedzieć! Technika ta sprawiała nam nieco kłopotów, ale przyniosła fantastyczne rezultaty! Wziut... i trajektoria subjądrowej cząstki ukazywała się w czerwono-żółtym świetle jarzącego się neonu. To było urocze urządzenie.

Aby poznać działanie komór iskrowych, zbudowaliśmy ich modele i umieściliśmy je na drodze wiązek elektronów i pionów. Większość komór w tamtych czasach miała około 0,1 metra kwadratowego powierzchni i składała się z 10-20 płyt. Nasz detektor chcieliśmy wyposażyć w 100 płyt, z których każda miała około 0,5 metra kwadratowego powierzchni i 2,5 centymetra grubości. I wszystkie zapraszały neutrina do zderzeń. Nasza grupa pracowała dniami i nocami - i jeszcze przy innych okazjach - by zbudować to urządzenie oraz towarzyszącą mu elektroniczną aparaturę. W miarę potrzeby wymyślaliśmy różne rzeczy: półkoliste szczeliny iskrowe, zautomatyzowane urządzenia do uszczelniania, rozmaite obwody elektryczne. Pomagało nam też kilku inżynierów i techników.

Rozpoczęliśmy eksperyment pod koniec 1960 roku i z miejsca zaczął nas dręczyć szum tła, wywołany przez neutrony i inne odłamki z tarczy, które przedzierały się przez naszą stalową blokadę, zapychając komorę iskrową i wypaczając wyniki. Nawet jeśli przedostawała się tylko jedna cząstka na miliard, to stwarzała nam problemy. Jedna szansa na miliard to chyba niezła definicja cudu, a jednak dla nas i to było za dużo. Męczyliśmy się tygodniami, zatykając wszystkie szpary, którymi mogły się wcisnąć neutrony. Wytrwale szukaliśmy przewodów elektrycznych biegnących pod podłogą (Mel kiedyś uwiązał w jednym z nich i paru silnych techników musiało go wyciągać). Wszędzie, gdzie blokada wydawała się nam za cienka, dokładaliśmy nowe zwały złomu. W pewnym momencie dyrektor nowiutkiego akceleratora w Brookhaven wyznaczył nam nieprzekraczalną granicę: „Po moim trupie będziecie zwalali to brudne żelastwo przy mojej maszynie!” - zagrzmiął. Nie przyjęliśmy tej oferty i poszliśmy tylko na niewielki kompromis. Pod koniec listopada zakłócenia tła zredukowaliśmy do poziomu, który był już do przyjęcia.

Oto na czym polegał nasz eksperyment. Protony z AGS trafiały w tarczę, wytwarzając przeciętnie trzy piony w wyniku każdego zderzenia. Mieliśmy około 10^{11} zderzeń na sekundę (100 miliardów). Powstawały też neutrony, protony, z rzadka jakiś antyproton i inne odłamki. Wszystko to, zmierzając w naszym kierunku, przebywało około piętnastu metrów wolnej przestrzeni, a potem wpadało na nieprzenikalną stalową ścianę. Do tego czasu około 10 procent pionów ulegało rozpadowi, mieliśmy więc kilkadziesiąt milionów neutrin. Tylko część z nich zmierzała we właściwym kierunku, w stronę naszej dziesięciometrowej ściany. Po drugiej stronie, zaraz za ścianą, czekał detektor - komora iskrowa. Według naszych ocen, przy pewnej dozie szczęścia powinno nam się udać zarejestrować mniej więcej jedno zdarzenie z udziałem neutrina na tydzień! W ciągu tygodnia z tarczy wytryskuje w kierunku detektora około 500 milionów miliardów (5×10^{17}) cząstek. Dlatego właśnie musieliśmy tak bardzo zredukować zakłócenia tła.

Spodziewaliśmy się zarejestrować dwa rodzaje zderzeń z udziałem neutrin: (1) neutrinu uderza w jądro aluminium, w wyniku czego powstaje mion i pobudzone jądro; (2) neutrinu uderza w jądro i powstaje elektron i pobudzone jądro. Zapomnijmy o jądrach, ważne jest to, że spodziewaliśmy się, iż miony i elektrony pojawią się w równych proporcjach, a od czasu do czasu będą im towarzyszyły protony oraz inne odłamki z pobudzonych jąder.

Cnota zatriumfowała i w ciągu ośmiu miesięcy trwania eksperymentu zaobserwowaliśmy 56 zderzeń z udziałem neutrin, z których być może pięć budziło wątpliwości. To brzmi bardzo prosto, ale ja nigdy, przenigdy nie zapomnę tego pierwszego przypadku neutrinowego. Wywołaliśmy rolę filmu - efekt tygodnia zbierania danych. Większość klitek była pusta albo ujawniała ślady promieniowania kosmicznego. Ale nagle ujrzeliśmy piękny ślad spektakularnego zderzenia, z długą ścieżką pozostawioną przez odlatujący w dal mion. To pierwsze zderzenie było dla nas olśniewającym momentem. Nabraliśmy pewności, że po tylu wysiłkach eksperyment przyniesie oczekiwane efekty.

Przede wszystkim musieliśmy udowodnić, że rzeczywiście biorą w tym udział neutrina, jako że był to pierwszy w świecie eksperyment tego rodzaju. Przywołaliśmy całe swe doświadczenie i każdy z nas po kolei odgrywał rolę adwokata diabła, próbując znaleźć luki w naszym rozumowaniu. Jednak dane były niepodważalne i przyszła pora na ogłoszenie wyników. Czuliśmy się dostatecznie pewnie, by przedstawić rezultaty kolegom. Trzeba było słyszeć Schwartza przemawiającego w zatłoczonym do granic możliwości audytorium w Brookhaven. Jak prawdziwy adwokat wykluczał jedną po drugiej wszystkie inne dopuszczalne interpretacje. Słuchacze śmiali się i płakali; z sali musiało wyprowadzić rozszlochaną matkę Mela.

Nasz eksperyment miał trzy (zawsze trzy) istotne konsekwencje. Pamiętasz, drogi Czytelniku, że Pauli jako pierwszy postulował istnienie neutrina, aby uzasadnić braki energii w procesie rozpadu beta, w którym z jądra wystrzelony jest elektron. Neutrina Pauliego zawsze były nieodłącznie związane z elektronami. Jednak w prawie wszystkich naszych przypadkach produktem zderzenia neutrina okazywał się mion. Nasze neutrina odmówiły produkowania elektronów. Dlaczego?

Musieliśmy przyznać, że neutrina, których używaliśmy, miały jakąś nową specyficzną własność, jakąś „mionowość”. Ponieważ neutrina te powstały razem z mionami w procesie rozpadu pionów, w nie znany nam sposób musiały być naznaczone „mionem”.

Aby to udowodnić słuchaczom, u których sceptycyzm jest cechą uwarunkowaną genetycznie, musieliśmy wiedzieć i umieć wykazać, że nasze urządzenia nie miały ta-

kich wad konstrukcyjnych, które spowodowałyby, iż chętniej wykrywają miony i przez to - czyli przez głupotę konstruktorów - nie mogą wykrywać elektronów. Znowu problem z lunetą Galileusza. Na szczęście potrafiliśmy udowodnić naszym krytykom, że aparatura działa bez zarzutu i wykrywa elektrony. Potwierdziliśmy to za pomocą próbných wiązek tych cząstek.

Inne zaburzenia mogły pochodzić od promieniowania kosmicznego. Na poziomie morza składa się ono głównie z mionów. Kiepski fizyk mógłby omyłkowo uznać mion promieniowania kosmicznego, który zatrzymał się w komorze, za mion wylatujący, powstały na skutek zderzenia neutrino, czyli za to, czegośmy poszukiwali. Zainstalowaliśmy blokadę, by się przed tym uchronić, ale skąd mogliśmy mieć pewność, że działa?

Zyskaliśmy tę pewność dzięki temu, że detektor był cały czas włączony, także wtedy, gdy akcelerator nie działał, czyli przez około 50 procent czasu. Wszelkie miony, które pojawiłyby się w tym czasie, byłyby nieproszonymi, kosmicznymi gośćmi. Ale nie przybył żaden: promieniowanie kosmiczne nie potrafiło przedrzeć się przez naszą blokadę.

Przytaczam wszystkie te techniczne szczegóły po to, by pokazać ci, drogi Czytelniku, że eksperymentowanie nie jest wcale łatwe, a interpretacja wyników doświadczenia to delikatna sprawa. Przed wejściem na basen kąpielowy Heisenberg powiedział kiedyś do kolegi: „Wszyscy ci ludzie wchodzą i wychodzą starannie ubrani, ale czy można na tej podstawie wyciągać wniosek, że także pływają w ubraniach?”

Musieliśmy zatem uznać, że w przyrodzie występują (co najmniej) dwa rodzaje neutrin: jeden związany z elektronami (zwykle waniliowe neutrino Pauliego), a drugi z mionami. Nazywamy je więc neutronami elektronowymi (zwykłymi) i neutronami mionowymi, czyli tymi, które wyprodukowaliśmy w naszym doświadczeniu. Te dwa rodzaje różnią się od siebie zapachem, jak to określa się w figlarnym żargonie fizyków zajmujących się modelem standardowym. Niektórzy zaczęli rysować taką oto tabelkę:

neutrino elektronowe	neutrino mionowe
elektron	mion

albo w fizycznej stenografii:

ν_e	ν_μ
e	μ

Elektron został umieszczony pod swym kuzynem, neutrinem elektronowym (na co wskazuje indeks u dołu), a mion pod neutrinem mionowym. Przypomnijmy, że przed eksperymentem znaleźliśmy trzy rodzaje leptonów: e, ν_e i μ , nie podlegające silnemu oddziaływaniu. Teraz pojawiły się cztery: e, ν_e , μ oraz ν_μ . Eksperyment został nazwany eksperymentem dwuneutrinowym i stał się kamieniem węgielnym modelu standardowego. Zauważ, drogi Czytelniku, że mamy dwie rodziny leptonów - cząstek punktowych. Elektron i neutrino elektronowe stanowią pierwszą rodzinę, która powszechnie występuje we Wszechświecie. Do drugiej rodziny należą mion i neutrino mionowe, których prawie nie znajdujemy we współczesnym Wszechświecie; trzeba je wyprodukować w akce-

leratorach albo w takich wysokoenergetycznych zderzeniach, jak te z udziałem promieniowania kosmicznego. Gdy Wszechświat był młody i gorący, także i te cząstki występowały powszechnie. Gdy odkryto mion, cięższego kuzyna elektronu, I. I. Rabi zapytał: „A kto to zamawiał?” Eksperyment z dwoma neutrino dostarczył jednej z pierwszych wskazówek, gdzie poszukiwać odpowiedzi.

No tak, istnienie dwóch neutrino rozwiązywało zagadkę brakującej reakcji: mion- $e-\gamma$. Przypomnijmy, że mion powinien rozpadać się na elektron i foton, ale nikt nie zdołał zaobserwować takiej reakcji, choć wielu próbowało. Poszukiwano śladów następującej sekwencji zdarzeń: mion rozpada się na elektron i dwa neutrino - zwykłe neutrino oraz antyneutrino. Te dwie cząstki, będąc materią i antimaterią, anihilują i w efekcie powstaje foton, ale nikt nigdy nie widział tych fotonów. Teraz powód był jasny. Dodatnio naładowany mion rozpadał się na pozyton i dwa neutrino, ale jest to neutrino elektronowe oraz neutrino antymionowe, które nie ulegają anihilacji. Po prostu pozostają sobie neutrino i nie powstaje żaden foton. Stąd też brak reakcji mion- $e-\gamma$.

Inną konsekwencją eksperymentu zbrodniczej spółki było stworzenie nowego narzędzia dla fizyki: gorących i zimnych wiązek neutrino. Pojawiły się one w stosownym czasie w CERN, Fermilabie, Brookhaven i Sierpuchowie. Pamiętajmy, że przed tym eksperymentem nie mieliśmy pewności, czy neutrino w ogóle istnieją. Teraz na zawołanie dysponowaliśmy całymi wiązkami tych cząstek.

Niektórzy, być może, zauważyli, że staram się nie poruszać pewnego zagadnienia. Co się stało z kryzysem numer jeden - z faktem, że nasze równanie opisujące oddziaływanie słabe nie działa przy wysokich energiach. Nasz eksperyment z 1961 roku pozwolił wykazać, że częstość zderzeń rzeczywiście wzrasta wraz ze wzrostem energii. W latach osiemdziesiątych wyżej wspomniane laboratoria - przy użyciu intensywniejszych wiązek o większych energiach i detektorów ważących setki ton - rejestrowały miliony zderzeń, w których uczestniczyły neutrino. (Rejestrowano po kilka zdarzeń na minutę, co stanowi wyraźną poprawę w porównaniu z naszym jednym zdarzeniem na tydzień). Mimo to wysokoenergetyczny kryzys oddziaływania słabego nie został rozwiązany, co najwyżej - rozjaśniony. Liczba zderzeń neutrino przy wyższych energiach rzeczywiście się zwiększała, zgodnie z przewidywaniem niskoenergetycznej teorii. Jednak lęk przed tym, że częstość zderzeń stałaby się zbyt duża, został złagodzony dzięki odkryciu cząstki W^\pm w 1982 roku. Cząstka ta ujawniła nowe procesy, które doprowadziły do modyfikacji teorii i do tego, że zaczęła się ona zachowywać w sposób nieco bardziej wyważony. Dzięki temu zażegnano na pewien czas kryzys, do którego jeszcze powrócimy.

Brazylijskie zadłużenie, krótkie spółniczki i vice versa

Trzecią konsekwencją eksperymentu było przyznanie Schwartzowi, Steinbergerowi i Ledermanowi Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki. Jednak stało się to dopiero w roku 1988 - 27 lat po doświadczeniu. Kiedyś słyszałem wywiad przeprowadzony z małym synkiem laureata:

„Czy chciałbyś dostać Nagrodę Nobla, tak jak twój tatuś? Nie - odpowiedział młody człowiek. Dlaczego? Chcę ją dostać sam”.

Nagroda. Ciśnie mi się na usta kilka uwag. Dla większości uczonych pracujących w dziedzinie fizyki Nobel to wspaniałe wyróżnienie. Być może ze względu na świetność

poprzednich laureatów, do których należą, poczynawszy od Roentgena (1901): Rutherford, Einstein, Bohr, Heisenberg... Fakt przyznania nagrody dodaje uczonemu swego rodzaju splendoru. Jeśli nawet chodzi o twojego najlepszego kolegę, z którym razem siusiałeś w lesie, to fakt przyznania mu nagrody zmienia go w jakiś sposób w twoich oczach.

Wiem, że w różnych okresach byłem nominowany. Przypuszczam, że mogłem dostać Nagrodę Nobla za „długo żyjący neutralny kaon”, który odkryłem w 1956 roku, bo był to całkiem interesujący obiekt i dziś używa się go podczas badań nad symetrią CP . Mogłem ją dostać za badania nad pionami, mionami i parzystością (razem z C. S. Wu), ale wtedy w Sztokholmie postanowiono uhonorować rozważania teoretyków. I pewnie była to rozsądna decyzja. Niemniej odkrycie przy okazji spolaryzowanych mionów i ich asymetrycznego rozkładu znalazło liczne zastosowania w fizyce ciała stałego, fizyce atomowej i molekularnej, i to do tego stopnia, że obecnie co roku odbywają się konferencje poświęcone temu zagadnieniu.

Z upływem lat październik zawsze stawał się okresem nerwowego oczekiwania, a po ogłoszeniu listy noblistów często dzwoniło do mnie któreś z moich kochanych dzieci z pytaniem „Dlaczego...?” A tak naprawdę żyje wielu fizyków - i jestem pewien, że odnosi się to także do kandydatów w dziedzinie chemii, medycyny, nauk humanistycznych - którzy nigdy nie otrzymają nagrody, choć ich osiągnięcia są równie istotne, jak tych, którzy zostają uhonorowani. Dlaczego? Nie wiem. Po trosze przypadek, okoliczności, wola Allacha.

Mnie szczęście dopisywało i nie narzekam na brak uznania. Za robienie tego, co uwielbiam robić, awansowano mnie do stopnia profesora i zaczęto przyzwolicie płacić. (Być profesorem na amerykańskim uniwersytecie to najlepsza posada w całej zachodniej cywilizacji: można robić, co tylko się chce, a nawet nauczać!) W latach 1956-1979 prowadziłem intensywne badania naukowe z 52 doktorantami, dopóki nie zostałem dyrektorem Fermilabu. W większości wypadków nagrody przychodziły, gdy byłem zbyt zajęty, by się ich spodziewać: wybór do Narodowej Akademii Nauk (1964), Prezydencki Medal Naukowy (Lyndon Johnson wręczył mi go w roku 1965) oraz różne inne medale i pochwały. W roku 1983 razem z Martinem Perlem otrzymaliśmy Państwową Nagrodę im. Wolfa, przyznaną przez Izrael za odkrycie trzeciej generacji kwarków i leptonów (kwark b i lepton τ). Przyznano mi też sporo stopni honorowych, ale tych jest zawsze pod dostatkiem, skoro setki uniwersytetów każdego roku poszukują czterech czy pięciu kandydatów do uhonorowania. W tej sytuacji można już osiągnąć niezbędne poczucie bezpieczeństwa i wykazywać zrównoważoną postawę wobec Nobla.

Gdy wreszcie przyszło zawiadomienie - w postaci dzwonka telefonu o szóstej rano, 10 października 1988 - wyzwoliło w nas ukryte pokłady niekontrolowanej wesołości. Po dostojnym przyjęciu wielkiej nowiny do wiadomości, zaczęliśmy się z moją żoną Ellen histerycznie śmiać i śmialiśmy się dopóty, dopóki nie rozdzwonił się telefon, a nasze życie zaczęło się zmieniać. Gdy reporter z „New York Timesa” zapytał, co zamierzam zrobić z otrzymanymi pieniędzmi, powiedziałem mu, że nie mogę się zdecydować, czy kupić kilka koni wyścigowych, czy zamek w Hiszpanii. Oczywiście, po kilku dniach zadzwonił pośrednik od nieruchomości i powiedział mi, że ma świetną okazję kupna *chateau* w Kastylii.

Otrzymanie Nagrody Nobla, kiedy jest się już stosunkowo znanym, ma pewne interesujące efekty uboczne. Byłem dyrektorem Fermilabu zatrudniającego około 2200 pracowników. Personel pławił się w atmosferze zainteresowania społecznego, całe zdarzenie traktowali jak coś w rodzaju wcześniejszego prezentu na Boże Narodzenie.

Trzeba było kilkakrotnie odbywać spotkania z personelem tak, żeby każdy miał okazję posłuchać szefa, który już i tak był całkiem zabawny, a którego teraz nagle zaczęto stawiać na równi z Johnnym Carsonem (a liczyli się z nim niektórzy bardzo ważni ludzie). Chicagowski „Sun-Times” wstrząsnął mną tytułem artykułu: NOBEL WPADŁ DO NASZEGO OGRÓDKA, a „New York Times” zamieścił u góry pierwszej strony zdjęcie, na którym widnieję z wywalonym językiem!

Wszystko to mija, pozostaje jednak respekt dla tytułu zauważalny wśród ogółu społeczeństwa. Na przyjęciach wydawanych w różnych częściach Chicago byłem przedstawiany jako laureat Pokojowej Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki. A kiedy chciałem zrobić coś spektakularnego, może nawet szalonego, żeby pomóc chicagowskim szkołom publicznym, namaszczenie Noblem naprawdę się przydało. Ludzie słuchali, drzwi się otwierały i nagle okazało się, że mamy przygotowany program poprawy nauczania przedmiotów ścisłych w wielkomiejskich szkołach publicznych. Nagroda jest niesłychanie skutecznym biletem pomagającym laureatowi w prowadzeniu społecznie użytecznej działalności. Drugą stroną tego medalu jest to, że niezależnie od tego, za co dostaje się Nagrodę Nobla, automatycznie zostaje się ekspertem od wszystkiego. Zadłużenie Brazylii? Oczywiście. Opieka społeczna? Jasne. „Proszę mi powiedzieć, profesorze Lederman, jaką długość powinny mieć damskie sukienki?” „Jak najkrótsze” - lubieżnie odpowiada laureat. Mam więc zamiar bezwstydnie wykorzystywać nagrodę, aby przyczynić się do poprawy poziomu nauczania przedmiotów przyrodniczych w Stanach Zjednoczonych. Do tego przydałaby się nawet druga Nagroda Nobla.

ODDZIAŁYWANIE SILNE

Sukcesy w rozszyfrowywaniu tajemnic oddziaływania słabego były znaczne, ale wciąż jeszcze nie dawały nam spokoju te setki hadronów - nadmierna obfitość cząstek podlegających oddziaływaniu silnemu, które utrzymuje jądro w całości. Hadrony charakteryzują się różnymi własnościami; niektóre z nich, takie jak ładunek, masa i spin, już omówiliśmy.

Weźmy na przykład piony. Istnieją trzy rodzaje pionów. Cząstki te, nieznacznie różniące się masą, po starannych analizach rozmaitych zderzeń zakwalifikowano jako członków jednej rodziny, którą - ku zaskoczeniu wszystkich - nazwano rodziną pionów. Ich ładunki wynoszą +1, -1 i 0 (obojętny). Okazało się, że wszystkie hadrony występują w podobnych rodzinnych grupach. Istnieją następujące kaony: K^+ , K^- , K^0 i \bar{K}^0 (+, - i 0 wskazują na rodzaj ładunku elektrycznego, a kreska nad drugim obojętnym kaonem oznacza, że jest to antycząstka). Portret rodzinny sigm wygląda następująco: Σ^+ , Σ^- , Σ^0 . Lepiej znaną Ci grupą, drogi Czytelniku, jest rodzina nukleonów: neutron i proton - składniki jądra atomowego.

Rodziny składają się z cząstek o podobnej masie i podobnym zachowaniu podczas silnych zderzeń. By wyrazić to bardziej precyzyjnie, wprowadzono pojęcie spinu izotopowego, czyli izospinu. Izospin jest pożyteczny z tego względu, że pozwala nam traktować nukleony jako jeden i ten sam obiekt, występujący w dwóch stanach izospinowych: neutron i proton. Podobnie piony występują w trzech stanach izospinowych: π^+ , π^- i π^0 . Inną pożyteczną własnością izospinu jest to, że zostaje zachowany w silnych zderzeniach (podobnie jak ładunek). W wyniku gwałtownego zderzenia protonu z anty-

protonem może powstać 47 pionów, 8 barionów i jeszcze trochę innych rzeczy, ale całkowita liczba izospinowa pozostaje nie zmieniona.

Rzecz w tym, że fizycy próbowali uporządkować hadrony, klasyfikując je ze względu na tyle własności, na ile się tylko dało. Wynaleźli więc mnóstwo własności o cudacznych nazwach: liczba określająca dziwność, liczba barionowa, liczba hiperonowa i tak dalej. Dlaczego liczba? Bo wszystko to są własności kwantowe i dlatego też nazywają się liczbami kwantowymi. Podlegają one zasadom zachowania. Dzięki temu teoretycy i eksperymetatorzy, którzy akurat nie zajmowali się eksperymentowaniem, mogli zabawiać się hadronami, porządkować je i zapewne pod wpływem kolegów biologów - klasyfikować w większe grupy rodzinne. Teoretycy kierowali się zasadami matematycznej symetrii, wychodząc z założenia, że fundamentalne równania powinny respektować tak głębokie symetrie.

Jeden szczególnie udany sposób uporządkowania został zaproponowany przez teoretyka z Caltech, Murraya Gell-Manna, który pod wpływem nauczania Buddy nazwał swój schemat Ośmiokrotną Ścieżką. „A oto jest, o mnisi, szlachetna prawda, co prowadzi do uwolnienia się od cierpień, oto jest szlachetna Ośmiokrotna Ścieżka: właściwe poglądy, właściwe zamiary, właściwa mowa...”¹ Gell-Mann niemal magicznie połączył hadrony w spójne grupy, składające się z ośmiu lub dziesięciu cząstek. Aluzja do buddyzmu była kolejną wyprawą w ezoteryczne rejony, tak często podejmowaną w fizyce, ale rozmaici mistycy podchwycili tę sposobność i nazwę i ogłosili, że jest ona dowodem na to, iż prawdziwy porządek świata ma związek ze wschodnim mistycyzmem.

Pod koniec lat siedemdziesiątych wplątałem się w kłopotliwą sytuację, kiedy z okazji odkrycia kwarka *b* poproszono mnie o napisanie krótkiej autobiografii dla gazetki wydawanej w Fermilabie. Nie przypuszczając, by ktokolwiek inny poza moimi współpracownikami z Batawii miał czytać to dzieło, zatytułowałem je *Nieautoryzowana Autobiografia napisana przez Leona Ledermana*. Ku memu przerażeniu została ona przedrukowana w gazetce w CERN, a potem w „Science”, oficjalnym czasopiśmie Amerykańskiego Towarzystwa Rozwoju Nauki, czytowanym przez setki tysięcy naukowców w Stanach Zjednoczonych. Był tam następujący fragment: „Okresem jego [Ledermana] najowocniejszej pracy twórczej był rok 1956, kiedy wysłuchał wykładu Gell-Manna, poświęconego możliwości istnienia neutralnego mezonu *K*. Z miejsca podjął dwie decyzje. Po pierwsze, podzielił swoje nazwisko za pomocą dywizu...”

Ale wracajmy do tematu. Nawet z innym nazwiskiem, Gell-Mann byłby i tak znakomitym teoretykiem. Ośmiokrotna Ścieżka dała początek tabelom cząstek przypominającym układ okresowy Mendelejewa, choć bez wątpienia bardziej wyrafinowanym. Przypomnijmy sobie układ okresowy z kolumnami pierwiastków mających podobne własności chemiczne. Ta okresowość stanowiła przesłankę wskazującą na istnienie powłok elektronów, jeszcze zanim czegokolwiek się o nich dowiedzieliśmy. Coś w atomach powtarzało się, będąc źródłem regularnego układu cech. Patrząc z perspektywy czasu - kiedy już rozumiemy strukturę atomu - wydaje się nam to oczywiste.

¹ O odkryciu tym można przeczytać w artykule G. F. Chewa, M. Gell-Manna oraz A. H. Rosenfelda, przetłumaczonym na język polski i opublikowanym w książce *Na tropach cząstek* (PWN, 1967), która poza tym zawiera artykuły m.in. P. A. M. Diraca, V. F. Weisskopfa i L. Ledermana (przyp. red.).

Wołania kwarków

Wkład hadronów uporządkowanych według rozmaitych liczb kwantowych także domagał się przyjęcia hipotezy, że mamy do czynienia z jakąś substrukturą. Jednak nie tak łatwo usłyszeć wołania subjadrowych cząstek. Udało się to dwóm fizykom o znakomicie wyostrzonym słuchu i napisali o tym. Gell-Mann zaproponował istnienie czegoś, co nazywał strukturami matematycznymi. W roku 1964 pisał, że układ hadronów da się wyjaśnić za pomocą trzech „tworów logicznych”. Nazwał je kwarkami. Powszechnie przyjmuje się, że znalazł to słowo w diabolicznej powieści Jamesa Joyce'a *Finnegans Wake* (w zdaniu: *Three quarks for Muster Mark!*). George Zweig miał identyczny pomysł, gdy pracował w CERN. On nazwał swoje trzy twory asami.

Prawdopodobnie nigdy nie dowiemy się, jak doszło do narodzin tego wspaniałego pomysłu. Znam jedną z wersji tej historii, bo byłem na miejscu: na Uniwersytecie Columbia w roku 1963. Gell-Mann mówił na seminarium o swojej Ośmiokrotnej Ścieżce symetrii hadronów, gdy teoretyk z tej uczelni, Robert Serber, zauważył, że możliwym wytłumaczeniem ósemkowego porządku byłoby istnienie trzech podjednostek. Gell-Mann zgodził się z tym, ale zaznaczył, że jeśli te podjednostki miałyby być cząstkami, to musiałyby mieć niesłychaną własność: ułamkowy ładunek elektryczny, czyli $1/3$, $2/3$, $-1/3$ i tak dalej.

W świecie cząstek wszystkie ładunki elektryczne mierzone są w jednostkach ładunku elektronu. Ładunek każdego elektronu równa się dokładnie $1,602193 \times 10^{-19}$ kulomba. Mniejsza o to, co to takiego ten kulomb. Zapamiętaj tylko, drogi Czytelniku, że używamy tej skomplikowanej liczby jako jednostki, która wyraża ładunek elektronu. Tak się szczęśliwie składa, że w tych jednostkach ładunek protonu także wynosi jeden (1,0000), podobnie ładunek naładowanego pionu, mionu (tu precyzja pomiaru jest jeszcze większa) i tak dalej. A zatem w przyrodzie ładunki występują w postaci liczb całkowitych: 0, 1, 2... Rozumie się przez to, że ładunki te są wielokrotnościami wyżej podanej liczby kulombów. Ładunki występują także w dwóch odmianach: dodatniej i ujemnej. Nie wiemy dlaczego, ale tak właśnie jest. Można by wyobrazić sobie świat, w którym elektron wskutek szczególnie gwałtownego zderzenia lub podczas gry w pokera straciłby 12 procent swego ładunku, ale jest to niemożliwe w naszym świecie. Elektron, proton, π^+ i inne cząstki zawsze mają ładunek równy 1,0000.

Kiedy więc Serber wspominał o cząstkach, których ładunek elektryczny wyrażałby się ułamkiem, spotkało się to z dość oczywistą reakcją: nie ma mowy. Takich rzeczy dotąd nie widziano i ten skądinąd ciekawy fakt, że wszystkie obserwowane ładunki są całkowitą wielokrotnością unikalnego i niezmiennego wzorca, został z biegiem czasu wbudowany w fundamenty intuicyjnego sposobu myślenia w fizyce. To skwantowanie ładunku elektrycznego było jedną z przyczyn poszukiwania jakiejś głębszej symetrii, która pozwoliłaby je wyjaśnić. Jednak Gell-Mann przemyślał sprawę dokładnie i sformułował hipotezę mówiącą o kwarkach. Jednocześnie rozvodnił całą sprawę (tak w każdym razie zdawało się niektórym z nas), sugerując, że kwarki nie są rzeczywistymi cząstkami, tylko stanowią użyteczny twór matematyczny.

Trzy kwarki, które urodziły się w 1964 roku, otrzymały nazwy górny - u (od ang. *up*), dolny - d (*down*) i dziwny - s (*strange*). Istnieją też, oczywiście, trzy antykwarki u , d i s . Trzeba było bardzo ostrożnie dobrać własności kwarków, aby dało się z nich zbudować wszystkie znane hadrony. Kwark u został obdarzony ładunkiem $+2/3$, kwarki d i

s otrzymały po $-1/3$. Antykwarki mają takie same ładunki, lecz o przeciwnym znaku. Inne liczby kwantowe również są tak dobierane, by ich suma wypadła poprawnie. Proton składa się z trzech kwarków - uud - o ładunkach $+2/3$, $+2/3$ i $-1/3$, co w sumie daje $+1$, czyli zgadza się z tym, co wiemy o protonie. Neutron jest kombinacją kwarków udd o ładunkach $+2/3$, $-1/3$ i $-1/3$. Ich suma wynosi zero, co również nam odpowiada, bo neutron jest neutralny.

Zgodnie z modelem kwarkowym wszystkie hadrony składają się z kwarków, niektóre z dwóch, inne z trzech. Istnieją dwie klasy hadronów: bariony i mezony. Bariony - rodzina, do której należą proton oraz neutron - składają się z trzech kwarków. Mezony, obejmujące piony i kaony, składają się z dwóch kwarków, ale musi to być zawsze para kwark-antkwark. Na przykład układ ud to dodatni pion (π^+). Jego ładunek wynosi $+2/3 + 1/3$, czyli jeden. (Zauważmy, że d , antydołny kwark, ma ładunek $+1/3$).

Gdy powstawała ta hipoteza, liczby kwantowe kwarków i ich własności, jak spin, ładunek i izospin, dobierano w ten sposób, by można było za ich pomocą wyjaśnić własności zaledwie kilku barionów (proton, neutron, Λ itd.) oraz mezonów. Potem okazało się, że te liczby i ich odpowiednie kombinacje pasują do wszystkich znanych hadronów. Całość działa. I wszystkie cechy obiektu złożonego - na przykład protonu - zależą od własności kwarków, z których się składa, modyfikowanych przez ich wzajemne oddziaływanie. Taki w każdym razie panuje pogląd, czy może raczej tak przedstawia się zadanie, stojące przed pokoleniami fizyków i pokoleniami komputerów, oczywiście pod warunkiem, że dostarczy się im danych.

Kombinacje kwarków związane są z interesującym zagadnieniem. Cechą typową dla ludzi jest modyfikowanie zachowania w zależności od towarzystwa, w jakim się obracają. Jak się jednak przekonamy, kwark nigdy nie jest sam, więc ich prawdziwe, pierwotne własności można określić jedynie drogą dedukcji na podstawie rozmaitych sytuacji, w jakich możemy je obserwować. W każdym razie, oto kilka typowych kombinacji kwarków oraz hadrony, jakie z nich powstają:

BARIONY		MEZONY	
uud	proton	ud	dodatni pion
udd	neutron	du	ujemny pion
uds	lambda	$uu + dd$	neutralny pion
uus	sigma plus	us	dodatni kaon
dds	sigma minus	su	ujemny kaon
uds	sigma zero	ds	neutralny kaon
dss	ksi minus	ds	neutralny antykaon
uss	ksi zero		

Fizycy radowali się spektakularnym sukcesem, który polegał na zredukowaniu setek, zdawałoby się, elementarnych obiektów do zaledwie trzech rodzajów kwarków. (Nazwa „as” zanikła. Jeśli idzie o zdolność do nadawania chwytliwych nazw, nikt nie jest w stanie wytrzymać konkurencji z Gell-Mannem). Dobrą teorię poznaje się po tym, czy pozwala formułować trafne przewidywania, a kwarkowa hipoteza odnosiła błyskotliwe

sukcesy. Na przykład w rejestrze odkrytych cząstek nie było takiej, która składa się z trzech dziwnych kwarków, ale to nie powstrzymało nas przed nadaniem jej nazwy omega minus (Ω^-). Ponieważ cząstki zawierające kwark s mają określone własności, można więc było łatwo przewidzieć cechy hadronu składającego się z trzech kwarków dziwnych (sss). Ω^- jest bardzo dziwną i charakterystyczną cząstką. W roku 1964 odkryto ją w komorze pęcherzykowej w Brookhaven i zachowywała się dokładnie tak, jak przewidywał Gell-Mann.

Nie rozwiązało to, rzecz jasna, wszystkich spornych kwestii. W żadnym wypadku! Pozostało wiele pytań. Na początek: co sprawia, że kwarki trzymają się razem? Ta potężna siła w ciągu trzydziestu lat stała się obiektem tysięcy prac teoretycznych i eksperymentalnych. Teoria zwana chromodynamiką kwantową zaproponowała nowy gatunek cząstek przenoszących oddziaływanie - gluonów - których zadaniem byłoby cementowanie (!!)

Zasady zachowania

W fizyce klasycznej obowiązują trzy fundamentalne zasady zachowania: energii, pędu i momentu pędu. Ustalono, że są one ściśle związane z pojęciem czasu i przestrzeni, o czym przekonamy się także i my w przedostatniej części wykładu. Teoria kwantów wprowadziła wiele dodatkowych wielkości, które także są zachowane, to znaczy nie ulegają zmianie w trakcie rozmaitych procesów subjądrowych, jądrowych i atomowych. Przykładem może być ładunek elektryczny, parzystość i całe mnóstwo nowych własności, takich jak izospin, dziwność, liczba barionowa czy liczba leptonowa. Wiemy już, że siły przyrody różnią się między sobą pod względem przestrzegania zasad zachowania; na przykład parzystość jest zachowana w oddziaływaniu silnym i elektromagnetycznym, lecz nie w słabym.

Aby sprawdzić zasadę zachowania, trzeba przeanalizować wielką liczbę reakcji, w których konkretną własność, powiedzmy ładunek elektryczny, można dokładnie określić przed reakcją i po niej. Przecież zasady zachowania energii i pędu były tak mocno ugruntowane, że w momencie, gdy wydawało się, iż pewne słabe procesy ich nie spełniają, zapostulowano istnienie neutrina, aby ocalić zasady. Posunięcie to okazało się trafne. Inną przesłanką, która świadczy o obowiązywaniu zasad zachowania, jest fakt, że pewne reakcje po prostu nie chcą zachodzić. Na przykład elektron nie rozpada się na dwa neutrina, bo pogwałciłoby to zasadę zachowania ładunku. Podobnie rzecz się ma z rozpadem protonów - nigdy do niego nie dochodzi. Protonom przypisano liczbę barionową, która wynika z ich trójkwarkowej budowy. Tak więc proton, neutron, lambda, sigma i tak dalej - wszystkie trójkwarkowce - mają liczbę barionową równą +1. Liczba barionowa odpowiadających im antycząstek wynosi -1. Wszystkie mezony, nośniki oddziaływania i leptony mają liczbę barionową równą zero. Jeśli zasada zachowania liczby barionowej obowiązuje w sposób ścisły, to najlżejszy barion - proton - nie może się rozpaść, ponieważ wszyscy lżejsi kandydaci na produkty rozpadu mają liczbę barionową równą zero. Oczywiście, w zderzeniu protonu z antyprotonem liczba barionowa równa się zero i w tym wypadku może powstać właściwie wszystko. Tak więc liczba barionowa wyjaśnia, dlaczego proton jest trwały. Neutron rozpada się na proton, elektron i antyneutrino. Proton uwięziony wewnątrz jądra rozpada się na neutron, pozyton i neutrina. W obu tych reakcjach przestrzegana jest zasada zachowania liczby barionowej.

Godzien litości jest ten, kto żyje wiecznie. Proton nie może rozpaść się na piony, bo pogwałciłby zasadę zachowania liczby barionowej. Nie może rozpaść się na neutron, pozyton i neutrino, gdyż zabrania mu tego zasada zachowania energii. Nie może rozpaść się na neutrina czy fotony ze względu na zasadę zachowania ładunku. Jest jeszcze więcej zasad zachowania i mamy wrażenie, że to właśnie one nadają światu kształt. Z oczywistych względów rozpad protonu zagrażałby naszej własnej egzystencji. Niewątpliwie wszystko zależałoby jeszcze od czasu życia protonów. Skoro Wszechświat ma około 15 miliardów lat, to znacznie dłuższy okres połowicznego rozpadu nie miałby zbyt wielkiego wpływu na losy Republiki.

Nowsze zunifikowane teorie pola przewidują jednak, że liczba barionowa nie jest ściśle zachowana. Ta przepowiednia dała impuls do podjęcia imponujących wysiłków mających na celu wykrycie rozpadu protonu (jak dotąd bez powodzenia) i stanowi dobrą ilustrację przybliżonych zasad zachowania. Jednym z przykładów takich zasad jest parzystość. Dziwność wprowadzono po to, by zrozumieć, dlaczego pewne bariony żyją znacznie dłużej, niż można się spodziewać, wzięwszy pod uwagę wszystkie stany końcowe możliwe do osiągnięcia na skutek rozpadu. Później dowiedzieliśmy się, że dziwność cząstki - lambdy czy kaonu - oznacza obecność kwarka s . Cząstki lambda i kaony rozpadają się w końcu, a w procesie tym kwark s ulega przemianie w kwark d . Jednak reakcja ta zachodzi pod wpływem oddziaływania słabego; oddziaływanie silne nie ma nic wspólnego z procesem $s \rightarrow d$. Innymi słowy, dziwność jest zachowana w oddziaływaniach silnych. Ponieważ zaś oddziaływanie słabe jest słabe, rozpad lambda, kaonów i innych członków tej rodziny przebiega powoli i cząstki te żyją długo - 10^{-10} sekundy zamiast 10^{-23} sekundy, typowego czasu życia, gdy dozwolone są rozpady zachodzące na skutek oddziaływań silnych.

Dobrze się stało, że dzięki eksperymentom zdobyto tak wiele danych świadczących o obowiązywaniu zasad zachowania, ponieważ istnieją matematyczne dowody na to, iż są one związane z głębokimi symetriami, których przestrzega przyroda. (A od Talesa po Sheldona Glashowa zawsze chodzi właśnie o symetrię). Związek ten został wykryty w 1920 roku przez matematyczkę Emmę Noether.

Ale wróćmy do naszej historii.

Niobowe jaja

Choć odkryto omegę minus i zanotowano inne sukcesy, nikt nigdy nie widział samego kwarka. Nie mówię tego jako sceptyczna słuchaczka wykładu, lecz jako fizyk. Zweig twierdził od początku, że asy/kwarki są rzeczywistymi obiektami, ale gdy John Peoples (obecny dyrektor Fermilabu) był młodym eksperymentatorem poszukującym kwarków, Gell-Mann powiedział mu, żeby sobie nimi nie zawracał głowy, gdyż kwarki służą tylko „do prowadzenia obliczeń”.

Powiedzenie czegoś takiego eksperymentatorowi jest równoznaczne z rzucając rękawicę. Wszędzie rozpoczęto poszukiwania kwarków. Oczywiście, zawsze, kiedy wywiesi się list gończy, sypią się fałszywe doniesienia. Ludzie szukali dziwnego ładunku elektrycznego ukrytego w promieniowaniu kosmicznym, w osadach na dnie oceanów, w starym, dobrym winie (n-nie ma tu kwarków, hep!). Przy próbach uwolnienia kwarków z pętających je okowów zatrudniono wszystkie akceleratory. Ładunek 1/3 lub

2/3 byłoby stosunkowo łatwo wykryć, ale i tak większość poszukiwań spetzła na niczym. Jeden eksperymentator z Uniwersytetu Stanforda ogłosił, że pochwyił kwark za pomocą maleńkich, precyzyjnie wykonanych kul z niobu. Euforia opadła, gdy nie udało się powtórzyć eksperymentu, a pozbawieni krzty respektu studenci nosili koszulki z napisem: „Musisz mieć jaja¹ z niobu, jeśli chcesz usidlić kwarki”.

Dziwaczność kwarków, niemożność ich znalezienia oraz dwuznaczność pierwotnej koncepcji spowodowały, że pomysł ten zaakceptowano dopiero pod koniec lat sześćdziesiątych, kiedy rezultaty innych eksperymentów zaczęły świadczyć o tym, iż istnienie kwarków - lub przynajmniej jakichś kwarkopodobnych stworów - jest niezbędne. Pojęcie kwarka wprowadzono po to, by wyjaśnić istnienie i własności wielkiej liczby hadronów, jeśli więc proton składa się z trzech kwarków, to dlaczego nie można ich zobaczyć? No cóż, już przedtem zdradziłem ten sekret. Można je „zobaczyć”. Powtarza się historia Rutherforda.

„Rutherford” wraca

Za pomocą nowych wiązek elektronów, produkowanych przez SLAC, rozpoczęto w 1967 roku serię eksperymentów rozproszeniowych. Chciano w ten sposób dokładniej zbadać strukturę protonu. Elektron o dużej energii nadlatuje i uderza w proton w wodorowej tarczy. Elektron opuszczający miejsce zderzenia ma dużo mniejszą energię i podąża w kierunku znacznie odchylnym od pierwotnego. Można powiedzieć, że punktowe obiekty wewnątrz protonu oddziałują na elektron podobnie jak jądro atomu na cząstki α Rutherforda, choć problem ten jest nieco subtelniejszy.

Zespołem z Uniwersytetu Stanforda kierowali Richard Taylor (fizyk pracujący w SLAC, Kanadyjczyk), Jerome Friedman i Henry Kendall (obaj z MIT). Wielką pomoc otrzymali od Richarda Feynmana i Jamesa Bjorkena, kibicujących im gorąco. Feynman służył swą energią i wyobraźnią przy rozwiązywaniu zagadnień związanych z oddziaływaniem silnym, a zwłaszcza przy szukaniu odpowiedzi na pytanie: „Co siedzi w środku protonu?” Często przyjeżdżał na Uniwersytet Stanforda ze swej stałej siedziby w Caltech w Pasadenie. Bjorken, teoretyk ze Stanford, był głęboko zainteresowany przebiegiem eksperymentu i regułami leżącymi u podstaw pozornie niespójnych danych. Twierdził, że reguły te powinny wskazywać na podstawowe prawa (we wnętrzu czarnej skrzynki) rządzące strukturą hadronów.

Musimy teraz wrócić na chwilę do naszych dobrych znajomych, Demokryta i Boškovića, którzy naświetlili to zagadnienie. Jako kryterium pozwalające określić, czy dana cząstka jest a-tomem, Demokryt przyjął jej niepodzielność. Według modelu kwarkowe-

¹ Nieprzetłumaczalna gra słów: w języku angielskim słowo *balls* oznacza zarówno „kule”, jak i (wulgarnie) „jaja” lub „jądra”. Nie sposób w tym miejscu powstrzymać się od opowiedzenia innej anegdoty, zbudowanej na tej samej niejednoznaczności. Anegdotę tę zawdzięczamy George'owi Gamowowi, który zawarł ją w swej autobiografii *My World Line*. Przebywając pod koniec lat trzydziestych w Cambridge u Rutherforda, pewnego dnia Gamow został wezwany do niego w trybie pilnym. Rutherford siedział na swym biurku, trzymając w ręce list. „Do diabła, o co im chodzi?!” - zawołał na widok Gamowa. Okazało się, że studenci z Rostowa nad Donem wystosowali list, w którym zawiadamiali Rutherforda, iż „wybrali go na honorowego przewodniczącego uniwersyteckiego Klubu Fizyków, ponieważ udowodnił, że atomy mają jaja” (przyp. red.).

go, proton jest tak naprawdę zlepkiem trzech szybko poruszających się kwarków, ale ponieważ kwarki te zawsze są ze sobą połączone, proton wydaje się być niepodzielną cząstką. Bošković wprowadził drugie kryterium. Cząstka elementarna, czyli a-tom, musi być punktem. Tego kryterium proton zdecydowanie nie spełnia. Zespół złożony z pracowników MIT i SLAC z pomocą Feynmana i Bjorkena uznał, że w tym wypadku operacyjnym kryterium powinna być raczej punktowość cząstki, a nie jej niepodzielność. Interpretacja uzyskanych danych w ramach modelu punktowych składników protonu wymagała znacznie więcej finezji niż w wypadku eksperymentu Rutherforda, dlatego też bardzo szczęśliwie się złożyło, że zespołowi pomagało dwóch najlepszych teoretyków na świecie. W rezultacie okazało się, że dane rzeczywiście wskazywały na obecność punktowych obiektów poruszających się wewnątrz protonu. W roku 1990 Taylor, Friedman i Kendall zgarnęli Nobla za udowodnienie istnienia kwarków. (To właśnie ich miał na myśli Jay Leno w cytacie otwierającym ten rozdział).

Jak mogli zobaczyć kwarki, skoro one nigdy nie są swobodne? Dobre pytanie. Wyobraź sobie, drogi Czytelniku, zamknięte pudełko zawierające trzy kulki. Potrząsasz nim, przechylasz na wszystkie strony, słuchasz i wyciągasz wniosek: trzy kulki. Inna sprawa, że kwarki zawsze wykrywa się w pobliżu innych kwarków i ta bliskość może zmieniać ich własności. Trzeba było zatem uwzględnić... *piano, piano*.

Teoria kwarków zyskiwała coraz więcej wyznawców, zwłaszcza że teoretycy śledzący napływ danych zaczęli obdarzać je coraz większą dozą realności, nadawali im coraz to nowe własności, a niemożność ich uwolnienia przeobrazili w swego rodzaju zaletę. Termin „uwięzienie” nagle zaczął się pojawiać na każdym kroku. Kwarki są uwięzione na stałe, ponieważ energia potrzebna, aby je rozdzielić, rośnie wraz ze wzrostem odległości między kwarkami. Toteż w miarę zwiększania wysiłków mających na celu rozdzielenie kwarków, okazuje się, że jest dość energii na wytworzenie nowej pary kwark-antykwar i zamiast dwóch kwarków mamy już cztery, czyli dwa mezony. To trochę tak, jakbyśmy próbowali zabrać ze sobą tylko jeden koniec sznurka. Sznurek pęka i... trach!... mamy dwa sznurki.

Ośrodki naukowe z zachodniego wybrzeża Stanów Zjednoczonych stały się w zasadzie monopolistami w dziedzinie rozszyfrowywania kwarkowej struktury na podstawie eksperymentów rozproszeniowych z udziałem elektronów. Muszę wszakże zaznaczyć, że bardzo podobne dane w tym samym czasie uzyskała moja grupa w Brookhaven. Żartowałem czasem, że gdyby Bjorken pracował we wschodnich stanach, to ja odkryłbym kwarki.

Dwa zupełnie różne doświadczenia przeprowadzone przez SLAC i Brookhaven dowodzą, że do kwarków można dotrzeć na kilka sposobów. W obu wypadkach wodór służył jako tarcza, ale Taylor, Friedman i Kendall używali elektronów w charakterze sond, my zaś posłużyliśmy się protonami. W SLAC w „rejon czarnej skrzynki zderzeń” posyłano elektrony i mierzono ich własności, gdy ów obszar opuszczały. Towarzyszyło im mnóstwo innych rzeczy, takich jak protony i piony, ale nie zwracano na nie uwagi. W Brookhaven zderzaliśmy protony z wiązki z protonami z jąder uranu i koncentrowaliśmy się na pomiarach powstających par mionów. (Tym, którzy nie uważali, przypominać, że elektrony i miony są leptonami o identycznych własnościach, tylko że mion jest prawie 200 razy cięższy od elektronu).

Mówiłem wcześniej, że eksperyment przeprowadzony w SLAC przypominał eksperyment, w którym Rutherford stwierdził istnienie jąder. Tylko że Rutherford po prostu odbijał cząstki alfa od jąder i mierzył kąty odbicia. Proces badany w SLAC był znacznie

bardziej skomplikowany. Używając języka teoretyków i odwołując się do wyobrażeń uformowanych na podstawie matematyki, mówi się, że nadlatujący elektron wysyła do czarnej skrzynki foton przenoszący oddziaływanie. Jeśli foton ten ma odpowiednie własności, może go pochłonąć któryś z kwarków. Gdy elektron odnosi sukces, to znaczy wysyła taki foton, który zostaje połknięty, zmienia się jego energia i kierunek ruchu. Opuszcza potem rejon czarnej skrzynki, odlatuje i zostaje namierzony. Innymi słowy, energia wychodzącego elektronu mówi nam coś o charakterze wysłanego fotonu i, co ważniejsze, o tym, co go połknęło. Zachowanie fotonów można interpretować tylko jako wynik absorpcji przez punktowe substruktury w protonie.

W dimionowym eksperymencie (nazwanym tak, bo powstają w nim pary mionów) przeprowadzonym w Brookhaven do rejonu czarnej skrzynki posyłałiśmy wysokoenergetyczne protony. Energia protonu sprawia, że z czarnej skrzynki emitowany jest foton, który, jeszcze zanim opuści rejon zderzenia, przekształca się w parę mion-antymion, i to właśnie te cząstki rejestrujemy. Podobnie jak w doświadczeniu w SLAC, dzięki temu pomiarowi możemy się dowiedzieć czegoś o własnościach fotonu. Jednak aż do roku 1972 nie rozumieliśmy podstaw teoretycznych tego eksperymentu; zresztą okazało się później, że bez wielu różnych subtelnych dowodów nie sposób go jednoznacznie zinterpretować.

Jako pierwsi zrobili to Sidney Drell i jego student Tung Mo Yan z Uniwersytetu Stanforda (nic dziwnego, tam wszyscy mają kwarki we krwi). Ich konkluzja: foton, który wytwarza parę mionów, powstaje wtedy, gdy kwark nadchodzącego protonu zderza się i anihiluje z antykwarkiem w tarczy (albo na odwrót). Dziś interpretacja ta jest powszechnie znana pod nazwą procesu Drella-Yana, choć to my wymyśliłiśmy ten eksperyment, a Drell „zaledwie” wynalazł odpowiedni model do jego opisu.

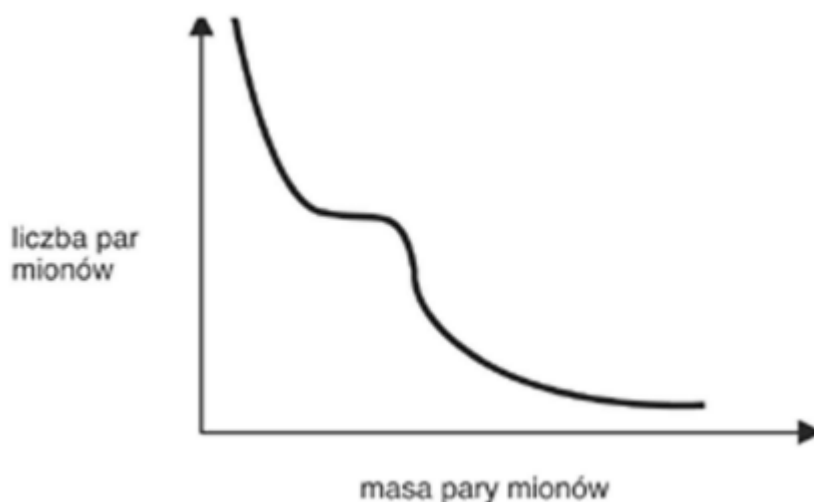
Gdy Richard Feynman w swej książce nazwał mój dimionowy eksperyment doświadczeniem Drella-Yana - z pewnością dla żartu - zadzwoniłem do Drella i poprosiłem go, żeby skontaktował się ze wszystkimi nabywcami tej książki i poprosił ich o wykreślenie „Drell-Yan” na stronie 47 i napisanie w tym miejscu „Lederman”. Nie śmiałem naprzykrzać się Feynmanowi. Drell z ochotą przystał na moją prośbę i sprawiedliwość zatriumfowała.

Od tego czasu przeprowadzono eksperyment Drella-Yana-Ledermana w niemal wszystkich laboratoriach. Uzyskano komplementarne dane potwierdzające szczegółowy opis procesu, w którym kwarki tworzą protony i mezony. Niemniej badania wykonane w SLAC i przez Drella-Yana-Ledermana nie przeobraziły wszystkich fizyków w wyznawców teorii kwarków. Niektórzy wciąż podchodzili do niej sceptycznie. W Brookhaven mieliśmy przekonującą wskazówkę, która mogłaby nawrócić nawet sceptyków, gdybyśmy tylko potrafili ją rozszyfrować.

W eksperymencie z roku 1968, pierwszym tego rodzaju, obserwowaliśmy gładki spadek liczby wytwarzanych par mionów ze wzrostem masy fotonów przenoszących oddziaływanie. Taki foton może mieć chwilowo dowolną masę, ale im jest ona większa, tym krócej foton żyje i tym trudniej go otrzymać. Znów Heisenberg. Pamiętaj, drogi Czytelniku, że im większa masa, tym mniejszy zasięg cząstki w przestrzeni, a zatem ze wzrostem energii powinniśmy obserwować coraz mniej zdarzeń (coraz mniejszą liczbę par mionów). Przedstawiamy tę zależność na wykresie. Na poziomej osi (x) odkładamy masę rosnącą w prawą stronę. Na pionowej osi (y) zaznaczamy liczbę par mionów. Powinniśmy więc otrzymać następujący wykres:



Powinniśmy uzyskać krzywą gładko opadającą, co miałyby wskazywać na zawsze malejącą liczbę produkowanych par mionów w miarę zwiększania energii fotonów opuszczających rejon czarnej skrzynki. Ale zamiast tego otrzymaliśmy coś, co wyglądało następująco:



Dla masy równej około 3 GeV ten gładki spadek zostaje zaburzony przez „ramię”, zwane dziś ramieniem Ledermana. Ramię, czyli wybrzuszenie na wykresie, wskazuje na występowanie nieoczekiwanych zdarzeń, na coś, czego nie sposób wytłumaczyć, odwołując się jedynie do fotonów. To coś nakłada się na zwykłe zdarzenia Drella-Yana. Niestety, nie potraktowaliśmy wówczas tego ramienia jako świadectwa istnienia nowej cząstki, zaprzepaściliśmy tym samym okazję dokonania odkrycia, które ponad wszelką wątpliwość potwierdziłoby realność kwarków.

Na marginesie trzeba dodać, że nasze rozżalenie, iż umknęło nam odkrycie punktowych obiektów wewnątrz protonu, odkrycie, które mocą szwedzkiego dekretu zostało przypisane Friedmanowi, Kendallowi i Taylorowi, jest tylko pozornym żalem. Chyba nawet Bjorken nie byłby w stanie dojrzeć w roku 1968 subtelnych związków łączących kwarki z dimionami z Brookhaven.

Patrząc z perspektywy czasu, eksperyment dimionowy należy do moich ulubionych. Jego koncepcja była nowatorska. Strona techniczna była dziecinnie prosta: tak

prosta, że straciłem okazję do dokonania głównego odkrycia dziesięciolecia. Na uzyskane wyniki składały się trzy rzeczy: dowód Drella-Yana na istnienie punktowych struktur, potwierdzenie koncepcji „koloru”, wynikające z mierzonej absolutnej częstości produkowanych mionów (później omówimy tę koncepcję) i odkrycie cząstki J/ψ (zaraz do niej dojdziemy). Każde z tych dokonań uhonorowano Noblem. Gdybyśmy przeprowadzili nasz eksperyment jak należy, Królewska Szwedzka Akademia Nauk mogłaby oszczędzić przynajmniej dwie nagrody!

Rewolucja Listopadowa

W latach 1972-1973 zainicjowano dwa eksperymenty, które zmieniły oblicze fizyki. Jeden rozpoczął się w Brookhaven - starej bazie wojskowej położonej wśród karłowatych sosen i piachu, w odległości 10 minut spaceru od najpiękniejszych plaż świata, na południowym krańcu Long Island. Miejscem drugiego był SLAC rozłożony wśród brunatnych wzgórz górujących nad kampusem Uniwersytetu Stanforda, zabudowanym w stylu hiszpańskim. Oba eksperymenty przeprowadzono ot tak sobie, żaden nie miał konkretnego celu, ale zakończyły się pod koniec roku 1974 z hukiem, który rozniósł się po całym świecie. Wydarzenia z końca roku 1974 zapisały się w historii fizyki jako Rewolucja Listopadowa. Gawędzą o niej przy ogniskach; wszędzie tam, gdzie gromadzą się fizycy, by wspominać dawne czasy, wielkich bohaterów i popijać źródlaną wodę. Odszedł w przeszłość prawie mistyczny pogląd teoretyków, że przyroda musi być śliczna i symetryczna.

Przed wszystkim musimy wspomnieć, że hipoteza kwarków niczym nie zagrażała pozycji elektronu jako cząstki elementarnej - a-tomu. Mieliśmy dwie klasy punktowych atomów - kwarki i leptony. Elektron wraz mionem i neutrinami należą do leptonów. Wszystko byłoby dobrze, gdyby nie to, że Schwartz, Steinberger i Lederman wypaczyli symetrię swoim dwuneutrinowym eksperymentem. Teraz były cztery leptony (elektron, neutrino elektronowe, mion i neutrino mionowe), ale tylko trzy kwarki (górny, dolny i dziwny). W roku 1972 tabelka z cząstkami elementarnymi mogłaby wyglądać następująco:

kwarki	$u \ d \ s$
leptony	$e \ \mu$
	$\nu_e \ \nu_\mu$

Błę! Zresztą nikt nie robiłby takiej tabelki, bo po co? Nie miałyby żadnego sensu. Leptony układały się w elegancki parzysty układ, natomiast kwarki stanowiły obrzydliwą trójkę, a przecież teoretycy już znacznie wcześniej zniechęcili się do liczby trzy.

Teoretycy Sheldon Glashow i James Bjorken już w roku 1964 zauważyli, że byłoby wprost uroczo, gdyby istniały cztery kwarki. Czwarty kwark przywróciłby symetrię między kwarkami a leptonami, symetrię, którą zaburzyło dokonane przez nas odkrycie neutrina mionowego - czwartego leptonu. W roku 1970 pojawił się bardziej przekonujący teoretyczny powód, aby podejrzewać, że czwarty kwark rzeczywiście istnieje. Sformułował go Glashow razem ze współpracownikami w pięknym, acz skomplikowanym wywodzie. Od

tego czasu Glashow stał się zagorzałym adwokatem kwarków. Napisał nawet kilka książek, by pokazać światu, jak zapamiętałe potrafi bronić ukochanej idei. Shelly, jak nazywają go jego wielbiciel i wrogowie, jeden z głównych architektów modelu standardowego, jest także bardzo ceniony za dar snucia opowieści, za cygara i krytyczne uwagi na temat trendów w teorii.

Glashow stał się aktywnym propagatorem teoretycznego wynalazku - czwartego kwarka - który nazwał (oczywiście) kwarkiem powabnym (*charm*). Podróżował po świecie, z seminarium na warsztaty, z warsztatów na konferencję, i namawiał doświadczalników do szukania powabnego kwarka. Chodziło mu o to, że nowy kwark i nowa symetria (kwarki także występowałyby w parach: górny/dolny i powabny/dziwny) pozwoliłyby pozbyć się wielu patologii widocznych w teorii oddziaływania słabego. Dzięki kwarkowi powabnemu można by było na przykład skasować pewne reakcje, których nie obserwowano, a które do tej pory teoria dopuszczała.

Z wolna Glashow zdobywał popleczników, przynajmniej pośród teoretyków. W lecie 1974 roku ukazał się przeglądowy artykuł „The Search for Charm” („Poszukiwania Powabu”), napisany przez Mary Gaillard (jedną z tragicznie niewiele kobiet w fizyce i jednego z najlepszych teoretyków obojga płci), Bena Lee i Jona Rosnera. Artykuł ten był szczególnie pouczający dla eksperymentatorów, ponieważ wykazywano w nim, że taki kwark, nazwijmy go c , i jego antykwark \bar{c} mogą powstać w czarnej skrzynce zderzenia i wyłonić się z niej jako neutralny mezon $c\bar{c}$, w którym oba kwarki są ze sobą związane. Uчени wyrazili nawet przypuszczenie, że stare dane dotyczące par mionów, zebrane w Brookhaven przez moją grupę, mogły właśnie świadczyć o rozpadzie mezonu $c\bar{c}$ na dwa miony, co tłumaczyłoby pojawianie się ramienia Ledermana w okolicy 3 GeV. Innymi słowy, mezon $c\bar{c}$ miał najprawdopodobniej masę równą 3 GeV.

Poszukiwanie wybruszeń

No tak, ale to wciąż było tylko gadanie teoretyków. W różnych publikowanych później relacjach z przebiegu Rewolucji Listopadowej próbowano dawać do zrozumienia, że eksperymentatorzy urabiali sobie ręce po łokcie, aby za wszelką cenę zweryfikować idee teoretyków. Nic podobnego. Badali tylko teren - to tu, to tam. W wypadku fizyków z Brookhaven, ich eksperyment sprowadzał się do polowania na wybruszenia: do poszukiwania nieoczekiwanych danych, które mogłyby wskazywać na jakieś nowe zjawisko - a więc czegoś, co pozwoliłoby podważyć całą teorię, a nie ją ugruntować.

Podczas gdy Glashow, Gaillard i inni rozprawiali o powabie, fizyka eksperymentalna zajmowała się swoimi własnymi problemami. Współzawodnictwo między akceleratorami elektronowo-pozytonowymi i protonowymi rozgorzało już wtedy na dobre. Leptonowcy wiedli ożywioną debatę z hadronowcami. Wprawdzie elektrony nie wskórały wiele, ale trzeba było słyszeć tę propagandę! Ponieważ uważa się, że elektrony są cząstkami pozbawionymi struktury, przyjmuje się, iż mogą one zapewnić „czyste” warunki początkowe: elektrony i pozytony zderzają się w czarnej skrzynce. Jasne i proste. Zgodnie z modelem opisującym te zderzenia, pierwszym etapem jest kolizja cząstki z antycząstką; w wyniku zderzenia powstaje foton o energii równej sumie energii obu cząstek.

Foton żyje bardzo krótko, szybko materializuje się w postaci par cząstek o stosownej masie, spinie i innych liczbach kwantowych, wymaganych przez zasady zachowa-

nia. Cząstki te opuszczają rejon czarnej skrzynki i zazwyczaj możemy obserwować: (1) elektron i pozyton, (2) parę mion-antymion albo (3) rozmaite hadrony w przeróżnych kombinacjach zależnych od warunków początkowych - energii i własności kwantowych fotonu. Bogactwo możliwych stanów końcowych wywodzących się od prostego stanu początkowego przemawia na korzyść tej techniki.

Porównaj to, drogi Czytelniku, ze zderzeniem dwóch protonów. Każdy proton to trzy kwarki, które wywierają na siebie nawzajem silne oddziaływanie. Oznacza to, że w szybkim tempie wymieniają między sobą gluony, cząstki przenoszące silne oddziaływanie (zapoznamy się z nimi później). Żeby jeszcze bardziej skomplikować obraz naszego protonu, po drodze od, powiedzmy, kwarka u do kwarka d gluon może na moment zapomnieć o swej misji i zmaterializować się (tak jak foton) w postaci pary kwark-antykwar, powiedzmy: s i \bar{s} . Kwarki te pojawiają się przelotnie, bo gluon musi szybko się pozbierać i dać się pochłoniąć, ale przecież i tak zdążą skomplikować sprawę.

Fizycy, którzy utknęli przy urządzeniach wykorzystujących elektrony, pogardliwie nazywali proton śmietnikiem i zderzenia protonu z protonem albo protonu z antyprotonem przedstawiali - nie bez racji - jako zderzenia dwóch śmietników, z których wylatują skorupki od jajek, skórki od bananów, fusy po kawie i podarte kupony totolotka.

Na przełomie lat 1973/1974 zbieranie danych rozpoczął stanfordzki akcelerator elektronów i pozytonów, zwany SPEAR. I wówczas natrafiono na niewytłumaczalne zjawisko. Wyglądało na to, że liczba zderzeń, w których wyniku powstawały hadrony, była większa od przewidywanej teoretycznie. Cała historia wyglądała bardzo skomplikowanie i niezbyt interesująco aż do października 1974 roku. Fizycy ze SLAC pod kierownictwem Burtona Richtera, będącego (zgodnie z odwieczną tradycją szefów grup) akurat na wakacjach, zaczęli zdawać sobie sprawę z ciekawego efektu, który pojawiał się, gdy suma energii zderzających się cząstek sięgała 3 GeV, czyli dość sugestywnej wielkości, jak może, drogi Czytelniku, pamiętać.

Pikanterii całej tej sprawie dodawało to, że pięć tysięcy kilometrów na wschód, w Brookhaven, grupa z MIT powtarzała nasz dimionowy eksperyment z 1967 roku. Kierował nim Samuel C. C. Ting. Krążą o nim plotki, że był liderem skautów na Tajwanie. Zrobił doktorat w Michigan, staż doktorski odbył w CERN i na początku lat sześćdziesiątych dołączył do mojej grupy jako starszy asystent na Uniwersytecie Columbia.

Ting był bardzo skrupulatnym, porządnym i dobrze zorganizowanym doświadczalnikiem. Pracował ze mną w Columbia przez kilka lat, następnie w laboratorium DESY pod Hamburgiem, a potem został profesorem w MIT. Szybko stał się w fizyce cząstek elementarnych siłą (piątą? szóstą?), z którą należało się liczyć. W liście polecającym, jaki dla niego napisałem, specjalnie podkreślałem niektóre jego słabsze strony - znana sztuczka w takich wypadkach - by zakończyć całość stwierdzeniem: „Ting - tak ważny w fizyce jak smak słodko-kwaśny w chińskiej kuchni”. Prawdę mówiąc, żywiłem w stosunku do niego swego rodzaju urazę, której źródło tkwiło w czasach, gdy mój ojciec prowadził małą pralnię. Jako dziecko nasłuchiwałem się wielu historii na temat chińskiej konkurencji z naprzeciwka. Od tego czasu każdy chiński fizyk sprawiał, że robiłem się niespokojny.

Gdy Ting pracował w elektronowym laboratorium DESY, stał się ekspertem od analizowania par elektron-pozyton, pochodzących ze zderzeń elektronów, i zdecydował, że korzystniejsza będzie detekcja par elektronów w eksperymencie Drella-Yana; przepraszam, chciałem powiedzieć w dileptonowym eksperymencie Tinga. A zatem w roku 1974 w Brookhaven Ting wykorzystywał (w odróżnieniu od konkurencji ze SLAC, pracu-

jącej z elektronami i pozytonami) wysokoenergetyczne protony skierowane na stacjonarną tarczę i za pomocą najnowszej aparatury analizował pary elektron-pozyton wyłaniające się z czarnej skrzynki. Dysponował znacznie precyzyjniejszymi detektorami niż to prymitywne urządzenie, które sami zmontowaliśmy siedem lat wcześniej. Za pomocą komór drutowych Charpaka mógł dokładnie określić masę fotonu wirtualnego czy cokolwiek innego, co dało początek obserwowanej parze elektron-pozyton. Ponieważ zarówno elektron, jak i mion są leptonami, tylko od Ciebie zależy, które z nich postanowisz wykrywać. Ting polował więc na wybrzuszenia, raczej rozglądał się w poszukiwaniu nowego zjawiska, niż próbował zweryfikować nową hipotezę. „Z przyjemnością mogę pójść z teoretykiem do chińskiej restauracji na obiad - stwierdził kiedyś Ting - ale robienie tego, o czym oni mówią, to zupełna strata czasu”. Trudno sobie wyobrazić kogoś o bardziej odpowiedniej osobowości dla odkrycia kwarka powabnego.

Zrządzeniem losu eksperymenty w Brookhaven i SLAC doprowadziły do tego samego odkrycia, ale aż do dziesiątego listopada 1974 roku obie grupy nic o sobie nawzajem nie wiedziały. Co łączy te dwa doświadczenia? W eksperymencie w SLAC elektron zderza się z pozytonem. W pierwszej fazie tego zderzenia powstaje wirtualny foton. W eksperymencie z Brookhaven na początku mamy niesłychanie skomplikowaną sytuację, ale tu obserwuje się te fotony tylko wtedy, gdy wyłonią się już z czarnej skrzynki i przemienią się w parę elektron-pozyton. A zatem w obu eksperymentach chodziło o fotony, które przejściowo mogą mieć dowolną masę/energię, zależną od siły zderzenia. Wielokrotnie wypróbowany model tego, co dzieje się podczas zderzeń w SLAC, mówi, że powstaje wtedy foton, który następnie przemienia się w hadrony: trzy piony albo pion i dwa kaony, albo proton, antyproton i dwa piony, albo kilka mionów czy elektronów i tak dalej. Mamy tu wiele możliwości, w zależności od początkowej energii, spinu, pędu i innych zmiennych.

Dlatego też, jeśli istnieje coś, co ma masę mniejszą od sumy energii dwóch zderzających się wiązek, to także może powstać na skutek tego zderzenia. A nawet jeśli to „coś” ma te same liczby kwantowe co foton, to może zdominować reakcję w wypadku, gdy suma energii zderzających się cząstek jest dokładnie równa masie tego czegoś. Mówiono mi, że dźwięk o pewnej określonej wysokości i sile zaśpiewany przez tenora może doprowadzić do pęknięcia szklanki. Nowe cząstki powstają w ten sam sposób.

W wersji eksperymentu z Brookhaven akcelerator posyła proton w nieruchomą tarczę; w danym wypadku w niewielki kawałek berylu. W chwili gdy stosunkowo duży proton uderza w stosunkowo duże jądro berylu, może się zdarzyć - i rzeczywiście się zdarza - wiele ciekawych rzeczy. Kwark uderza w kwark, kwark uderza w antykwark, kwark uderza w gluon, gluon uderza w gluon. Niezależnie od tego, jaką energię akcelerator nadaje protonowi, są to zderzenia o znacznie mniejszej energii, bo kwarki - składniki protonu - dysponują tylko częścią jego całkowitej energii. Dlatego też pary leptonów rejestrowane przez Tinga wyłaniały się z maszyny z przypadkowymi energiami. Zaletą tak skomplikowanego stanu początkowego jest to, że z określonym prawdopodobieństwem można wyprodukować wszystko, co tylko się da przy danej energii. Strasznie dużo może się zdarzyć podczas zderzenia dwóch śmietników. Niestety, nowych rzeczy trzeba szukać na wielkiej stercie rupieci. Żeby przekonująco udowodnić istnienie nowej cząstki, potrzeba wielu cykli eksperymentalnych. I jeszcze potrzebny jest dobry detektor. Na szczęście Ting miał istne cacuszko.

Wręcz przeciwnie rzecz się miała ze SPEAR w SLAC. Tam zderzały się elektrony z pozytonami. Proste. Punktowe cząstki - materia z antymaterią - zderzają się i anihilują.

Materia zmienia się w czyste światło - foton wirtualny. Ta paczuska energii z kolei przekształca się w materię. Jeśli obie wiązki mają, powiedzmy, 1,5525 GeV, to w każdym zderzeniu uczestniczy dokładnie dwa razy tyle energii - 3,105 GeV. I jeśli istnieje cząstka o tej właśnie masie, to powstanie w miejsce fotonu. Prawie że nie ma wyjścia: trzeba dokonać odkrycia. Wszystkie zderzenia mają jednakową, z góry określoną energię. By ją zmienić, fizycy muszą przestawić magnesy i wyregulować mnóstwo innych rzeczy. Fizycy na Uniwersytecie Stanforda nauczyli się bardzo precyzyjnie dobrać energię maszyny, znacznie precyzyjniej, niż zakładał to pierwotny projekt tego urządzenia, co było podziwu godnym osiągnięciem technicznym. Szczerze mówiąc, nie sądziłem, że im się to uda. Wadą tego typu urządzeń jest to, że trzeba bardzo powoli, w minimalnych odstępach przemierzać całe obszary energii. Z drugiej strony, jeśli się trafi na właściwą energię - albo jeśli się ma dostęp do poufnych informacji, i o to właśnie rozgorzał cały spór - w ciągu kilku godzin można odkryć nową cząstkę.

Wróćmy na moment do Brookhaven. W latach 1967-1968, gdy zaobserwowaliśmy dziwne ramie dimionowe, mierzyliśmy cząstki o energii od 1 GeV do 6 GeV. Przy 6 GeV liczba par mionów była milion razy mniejsza niż przy 1 GeV. Przy 3 GeV liczba otrzymywanych par mionów wyraźnie się zwiększała aż do mniej więcej 3,5 GeV, kiedy to znowu pojawiła się silna tendencja spadkowa. W roku 1967, gdy przygotowywaliśmy się do opublikowania danych, długo się spierałem - „my” to znaczy siedmiu autorów eksperymentu - jak zinterpretować to ramie. Czy była to cząstka, której przejawy zniekształcił wpływ detektora? Czy nowy proces fizyczny, w którym wirtualne fotony powstają w innych niż dotąd ilościach? W 1969 roku nikt nie wiedział, jak powstają pary mionów. Zdecydowałem, że dane nie były dostatecznie wiarygodne, żeby ogłosić odkrycie.

No cóż, w spektakularnej konfrontacji w dniu 11 listopada 1974 okazało się, że obie grupy - ze SLAC i z Brookhaven - dysponują wyraźnymi danymi na temat wzmocnienia w rejonie 3,105 GeV. Gdy w SLAC nastawiono urządzenie na tę właśnie energię (co samo w sobie jest niemałym wyczynem!), liczniki rejestrujące zderzenia oszałały: stokrotnie wzrosła liczba rejestrowanych kolizji; opadała ona z powrotem do poziomu wyjściowego, gdy akcelerator nastawiano na 3,100 lub 3,120 GeV. Trudno było znaleźć tę cząstkę z powodu bardzo małej szerokości rezonansu. Już przedtem sprawdzano ten zakres energii w czasie trwania eksperymentu, ale zjawiska nie dostrzeżono. W danych Tinga z Brookhaven dokładne pomiary par leptonów wskazywały na istnienie wyraźnego wzniesienia w pobliżu 3,10 GeV. On także stwierdził, że wzniesienie to może oznaczać tylko jedno - odkrycie nowego stanu materii.

Po ogłoszeniu wyników rozgorzała bardzo ostra dyskusja na temat tego, kto był pierwszy? Oskarżenia i plotki latały w tę i z powrotem. Jeden z zarzutów głosił, że naukowcy ze SLAC znali wstępne wyniki Tinga i dlatego wiedzieli, gdzie szukać nowej cząstki. Druga strona utrzymywała, że na początku wzniesienie Tinga nie było przekonujące i został dopracowany dopiero w ciągu paru godzin dzielących ogłoszenie wyników SLAC od oświadczenia Tinga. Grupa ze SLAC nazwała swoją cząstkę psi (Ψ). Ting nadał jej imię *J*. Obecnie nazywa się ją J/Ψ lub J/ψ . W środowisku fizyków zapanowała znowu miłość i harmonia. Mniej więcej.

Skąd to całe zamieszanie (i trochę kwaśnych winogron)

Wszystko to jest szalenie ciekawe, ale po co tyle hałasu? Wiadomość o wspólnym oświadczeniu z jedenastego listopada rozniosła się natychmiast po całym świecie. Tak wspomina te dni jeden z naukowców z CERN: „To było nie do opisania. Wszyscy o tym rozmawiali na korytarzach”. O odkryciu poinformował „New York Times” w niedzielnym wydaniu na pierwszej stronie:

ZNALEZIONO NOWY I ZADZIWIAJĄCY RODZAJ CZĄSTKI ELEMENTARNEJ. „Science”: DWIE NOWE CZĄSTKI RADUJĄ I ZADZIWIAJĄ FIZYKÓW.

A Walter Sullivan, jeden z najlepszych popularyzatorów nauki, napisał później w „New York Timesie”: „Chyba jeszcze nigdy w fizyce nie zapanowała podobna wrzawa... i nie zanosi się, że szybko się to wszystko uspokoi”. Zaledwie dwa lata później, w roku 1976, Ting i Richter wspólnie otrzymali Nagrodę Nobla za odkrycie J/Ψ .

Wiadomość o odkryciu dotarła do mnie, gdy ciężko pracowałem w Fermilabie nad eksperymentem o egzotycznej nazwie E-70. Czy potrafię teraz, po siedemnastu latach, przypomnieć sobie uczucia, których wtedy doświadczyłem? Jako naukowiec i fizyk cząstek elementarnych ucieszyłem się dokonaniem przełomu. Radość ta zmieszana była oczywiście z zazdrością, a nawet z odrobiną morderczej zawiści wobec odkrywców. To normalna reakcja. Przecież ja już to zrobiłem - Ting powtarzał mój eksperyment! To prawda, że w latach 1967-1968 nie istniały jeszcze detektory, które pozwoliłyby Tingowi przeprowadzić tak dokładne pomiary. Niemniej stary eksperyment z Brookhaven miał w sobie elementy godne uhonorowania dwiema Nagrodami Nobla - gdybyśmy tylko mieli lepsze detektory i gdyby Bjorken pracował w Columbia, i gdybyśmy byli ciut inteligentniejsi... Gdyby babcia miała wąsy...

No cóż, sam jestem sobie winien. Po znalezieniu w roku 1967 tajemniczego pagórka, postanowiłem dalej badać dileptony za pomocą nowych, właśnie wprowadzanych potężniejszych maszyn. W roku 1971 CERN miał uruchomić nowy akcelerator protonów, ISR, o efektywnej energii dwudziestokrotnie wyższej niż dostępna w urządzeniu pracującym w Brookhaven. Porzuciłem więc wróbla, którego miałem w garści, i zgłosiłem projekt badawczy w CERN. Gdy zaczęliśmy zbierać dane w roku 1972, znów nie udało mi się dostrzec J/ψ , tym razem na skutek bardzo silnego tła nieproszonych pionów. Ponadto nowe urządzenie napromieniowywało nasz nowiutki detektor cząstek ze szkłem ołowiowym, o czym nie mieliśmy pojęcia. Zaobserwowane tło samo w sobie okazało się odkryciem - zarejestrowaliśmy hadrony o dużym pędzie poprzecznym. Były to kolejne dane świadczące o kwarkowej budowie protonu.

Tymczasem w roku 1971 przygotowywano się do uruchomienia w Fermilabie „dwusetki”. Tam też próbowałem szczęścia. Eksperyment w Fermilabie rozpoczął się na początku 1973 roku i na swe usprawiedliwienie mam... No cóż, tak naprawdę to nie zabraliśmy się nawet do robienia tego, co planowaliśmy, bo zainteresowały nas ciekawe dane, jakie otrzymywały inne grupy pracujące w nowym laboratorium Fermilabu. Wszystko spęzło na niczym i zanim wreszcie znowu zabraliśmy się do dileptonów, Rewolucję Listopadową opisywano już w podręcznikach. Tak więc nie tylko przegapiłem cząstkę J/ψ w Brookhaven, ale także na dwóch nowych maszynach, co stanowi swego rodzaju rekord zaniedbania w fizyce cząstek elementarnych.

Nie odpowiedziałem jeszcze na pytanie: no i co z tego? J/ψ jest hadronem, ale przecież odkryliśmy już przedtem setki hadronów. Czemu mielibyśmy się podniecać jeszcze jednym, nawet jeśli ma tak fikuśną nazwę? Chodzi o to, że ma bardzo dużą masę - jest trzykrotnie cięższy od protonu, i o to, że jego masa jest bardzo wąska - jej szerokość nie przekracza 0,05 MeV.

Wąska szerokość? Oznacza to rzecz następującą: nietrwała cząstka nie może mieć wyraźnej, ściśle określonej masy. Mówi o tym zasada nieoznaczoności Heisenberga. Im krótszy okres życia cząstki, tym szerszy jest jej rozkład masy. Jest to związek kwantowy. Mówiąc o rozkładzie masy, mamy na myśli to, że seria pomiarów daje w efekcie różne wyniki, których wykres przyjmuje kształt krzywej dzwonowej, znanej z rachunku prawdopodobieństwa. Maksymalna wartość tej krzywej, powiedzmy przy 3,105 GeV, zwana jest masą cząstki, a wielkość odchylenia pomiarów od tej wielkości jest związana z długością życia cząstki. Skoro nieokreśloność odbija się w pomiarze, możemy to ująć w ten sposób, że w wypadku trwałej cząstki dysponujemy w zasadzie nieskończonym czasem na dokonanie pomiaru jej masy i dlatego rozrzut wyników jest nieskończenie wąski. Natomiast nie można zmierzyć z dowolną dokładnością masy bardzo krótko żyjącej cząstki (nawet hipotetycznie). Choćbyśmy użyli najczulszej aparatury, zawsze otrzymamy znacznie różniące się od siebie rezultaty. Na przykład typowa cząstka podlegająca oddziaływaniu silnemu rozpada się w ciągu 10^{-23} sekundy, a rozrzut masy wynosi około 100 MeV.

Jeszcze jedna sprawa. Wspominałem, że wszystkie hadrony oprócz swobodnego protonu są nietrwałe. Im większa jest masa hadronu czy jakiegokolwiek innej cząstki, tym krócej ona żyje, bo ma do wyboru więcej różnych możliwości rozpadu. A tu nie dość, że znajdujemy J/ψ o ogromnej masie (w roku 1974 była najcięższą ze wszystkich znanych cząstek), to jeszcze na dodatek stwierdzamy, iż ma nadzwyczaj niewielki rozkład masy, ponad tysiąc razy węższy niż typowa cząstka podlegająca oddziaływaniu silnemu. Czyli jest ona bardzo trwała. Coś powstrzymuje ją przed rozpadem.

Nagi powab

Co opóźnia jej rozpad? Wszyscy teoretycy podnoszą rękę: nowa liczba kwantowa albo, co na jedno wychodzi, nowa zasada zachowania. Jakiego rodzaju zasada zachowania? Co jej podlega? Ach, na to już każdy dawał inną odpowiedź - do pewnego czasu.

Dane wciąż napływały, ale już tylko z maszyn zderzających elektrony z pozytonami. Do akceleratora SPEAR dołączył włoski ADONE, a później niemiecki DORIS. Kolejne wybrzuszenie ukazało się przy energii równej 3,7 GeV. Nazwijmy je Ψ' (psi prim); nie ma potrzeby wspominać J , jako że było to w całości dziełem Uniwersytetu Stanforda. (Ting i reszta wypadli z gry: ich urządzenie zaledwie zdołało doprowadzić do odkrycia cząstki, ale już nie dało sobie rady z badaniem jej własności). Jednak pomimo gorączkowych wysiłków, próby wyjaśnienia zadziwiająco małej szerokości J/ψ początkowo nie przynosiły żadnych rezultatów.

W końcu jedna z koncepcji zaczęła znajdować coraz powszechniejsze uznanie. Być może J/ψ jest długo oczekiwanym związkiem c i \bar{c} - kwarka powabnego i jego antykwarka. Innymi słowy, może to jest mezon, przedstawiciel tej klasy hadronów, które składają się z kwarka i antykwarka. Glashow nie posiadał się z radości i nazwał J/ψ „charmonium”. Jak się później okazało, ta interpretacja była poprawna, ale udało się ją zweryfikować dopiero po dwóch latach. Trudności wynikały z tego, że kiedy c łączy się z \bar{c} , znikają własności charakterystyczne dla powabu. Co c wnosi, to \bar{c} znosi. Wpraw-

dzie wszystkie mezony składają się z kwarka i antykwarka, lecz nie zawsze musi to być kwark i jego własny antykwark. Pion na przykład tworzy para ud .

Rozpoczęły się poszukiwania „nagiego powabu” - mezonu składającego się z kwarka powabnego złączonego z, powiedzmy, antydolnym. Antydolny kwark nie skasowałby powabnych własności partnera, które mogłyby wtedy ukazać się w całej swej krasie. Byłaby to sytuacja prawie idealna, skoro idealna - wolny kwark - jest niemożliwa. Mezon cd znaleziono na Uniwersytecie Stanforda w 1976 roku za pomocą akceleratora elektronów i pozytonów. Dokonała tego grupa naukowców ze SLAC i Berkeley pod kierownictwem Gersona Goldhabera. Częstkę nazwano D^0 (D zero), a badania jej własności trwały przez kolejne piętnaście lat. Dziś takie mezony jak cd , cs , czy cu dostarczają nam dziesiątek młodych doktorów. Ich badania przyczyniają się do wzbogacenia naszej wiedzy o własnościach kwarków.

Teraz wreszcie wiadomo było, skąd się bierze wąskość J/ψ . Powab jest nową liczbą kwantową, a zasady zachowania rządzące oddziaływaniem silnym nie pozwalają, by kwark c zmieniał się w kwark o mniejszej masie. Dokonać tego może jedynie oddziaływanie słabe i elektromagnetyczne, ale te działają znacznie wolniej, stąd właśnie długi okres życia i mała szerokość masy.

Mniej więcej w tym samym okresie pozbyto się ostatnich zastrzeżeń żywionych wobec koncepcji kwarków: dzięki tej hipotezie sformułowano daleko idące przewidywania, które zostały potwierdzone. Prawdopodobnie nawet Gell-Mann zaczął obdarzać kwarki jakimiś elementami realności, choć problem ich uwięzienia - nie może istnieć coś takiego jak „swobodny” kwark - wciąż odróżnia kwarki od innych znanych nam cząstek materii. Z powabem układ okresowy cząstek znowu wyglądał porządnie:

KWARKI	
górnny (u)	powabny (c)
dolny (d)	dziwny (s)
LEPTONY	
neutrino elektronowe (ν_e)	neutrino mionowe (ν_μ)
elektron (e)	mion (μ)

Mamy teraz cztery kwarki - to znaczy cztery zapachy kwarków - oraz cztery leptony. Możemy mówić zatem o dwóch generacjach cząstek, zajmujących w naszej tabeli oddzielne kolumny. Cząstki u , d , ν_e oraz e należą do pierwszej generacji. Ponieważ u i d tworzą protony i neutrony, ta rodzina dominuje w naszym współczesnym świecie. Drugą generację: c , s , ν_μ oraz μ , można spotkać w intensywnym, choć ulotnym żarze akceleratorowych zderzeń. Nie powinniśmy ignorować tych cząstek, choć mogą się nam wydawać niezwykle egzotyczne. My, nieustraszeni odkrywcy, musimy zrozumieć, jaką rolę wyznaczyła im przyroda.

Nie oddałem tu w pełni sprawiedliwości teoretykom, którzy przewidzieli istnienie takiej cząstki i pomogli udowodnić, że J/ψ to charmonium. Jeśli SLAC był eksperymentalnym sercem całego tego przedsięwzięcia, to Uniwersytet Harvarda okazał się jego teoretycznym mózgiem. Sheldon Glashow i jego kolega ze szkoły średniej, Steve Weinberg, korzystali z pomocy całego stadka młodych zdolnych magików. Wymienię tu

tylko Helen Quinn, ponieważ znajdowała się w centrum euforii towarzyszącej odkryciu charmonium i po dziś dzień jest jednym z moich ideałów.

Trzecia generacja

Zatrzymajmy się na chwilę. Zawsze trudniej jest opisywać niedawne zdarzenia, zwłaszcza jeśli samemu brało się w nich udział. Nie upłynęło jeszcze dość czasu, by nabrać stosownego dystansu i stać się bardziej obiektywnym, ale spróbujemy.

Mieliśmy lata siedemdziesiąte i dzięki znacznemu zwiększeniu rozmiarów akceleratorów i wyrafinowanym detektorom postęp na drodze do odkrycia a -tomu nabrał tempa. Doświadczalnicy zajmowali się wieloma zagadnieniami, zdobywali wiedzę na temat rozmaitych powabnych obiektów, badali oddziaływania w coraz bardziej mikroskopowym ujęciu, myskowali w rejonach najwyższych osiągalnych energii. Słowem, zajmowali się najistotniejszymi bieżącymi problemami. Potem postęp ten został przyhamowany, gdyż coraz trudniej przychodziło znajdowanie funduszy na prowadzenie badań. Wojna w Wietnamie, która wyczerpała nie tylko naszego ducha, lecz także skarbiec, kryzys paliwowy i ogólna chandra spowodowały odwrót od badań podstawowych. Nasi koledzy uprawiający Małą Naukę ucierpieli na tym wszystkim jeszcze bardziej niż my, bo fizykę wysokich energii przed takimi niekorzystnymi skutkami częściowo chroni to, że naukowcy łączą swe wysiłki i wspólnie korzystają z wielkich laboratoriów.

Teoretycy, którzy nie potrzebują dużych funduszy - wystarczy im ołówek, trochę papieru i wygodny gabinet - rozkwitali, zalewani strumieniami świeżych danych. Wciąż jeszcze działali niektórzy z wielkich - Lee, Yang, Feynman, Gell-Mann, Glashow, Weinberg i Bjorken, ale wkrótce dołączyły do nich nowe wielkie nazwiska: Martinus Veltman, Gerard 't Hooft, Abdus Salam, Jeffrey Goldstone i Peter Higgs.

Przyjrzyjmy się pokrótce kilku szczytowym osiągnięciom eksperymentalnym ostatniego okresu, niesprawiedliwie wyróżniając w ten sposób „odważne wypadki w nieznanne” przed „powolnym, systematycznym przesuwaniem granicy”. W roku 1975 Martin Perl, prawie w pojedynkę walcząc ze współpracownikami w stylu d'Artagnana, przekonał ich, a w końcu także i wszystkich innych, że wśród danych zebranych w SLAC czai się piąty lepton. Nazwano go taonem (τ). Podobnie jak jego lżejsi kuzyni, e i μ , również taon może mieć dwa znaki ładunku: τ^+ i τ^- .

Rodziła się trzecia generacja. Ponieważ zarówno elektron, jak i mion mają związane ze sobą neutrino, wydawało się naturalne, że należy założyć istnienie także neutrino taonowego (ν_τ).

Tymczasem grupa Ledermana w Fermilabie nauczyła się poprawnie wykonywać eksperyment dimionowy i nowe, znacznie bardziej efektywne ustawienie aparatury pozwoliło na badanie nowego przedziału masy: od J/ψ aż do 25 GeV - górnej granicy, na jaką pozwalała energia 400 GeV akceleratora w Fermilabie. (Pamiętaj, drogi Czytelniku, że mówimy tu o stacjonarnych tarczach, dlatego efektywna energia stanowi tylko ułamek całkowitej energii wiązki). I oto przy energii 9,4, 10,0 i 10,4 GeV pojawiły się trzy nowe wzgórki, widoczne tak jasno i wyraźnie, jak szczyty Tetonów są widoczne w słoneczny dzień z narciarskiego miasteczka Grand Targhee. Gwałtowny napływ danych wzbogacił światową kolekcję zdarzeń dimionowych niemal stukrotnie. Naszą nową cząstkę nazwaliśmy ypsilonem (zdawało nam się, że była to ostatnia wolna litera grec-

ka). Powtórzyła się historia J/ψ , z tą różnicą, że w tym wypadku nowym kwarkiem był kwark b od słowa *beauty* (po angielsku oznacza ono - piękno), przez innych fizyków, bez krztyny artyzmu w duszy, zwany *bottom* (denny lub spodni). Uznano, że ypsilon składa się z kwarka b związanego z *anty-b*. Większe obserwowane masy odpowiadały po prostu stanom wzbudzonym tej nowej cząstki. Odkrycie to nikogo nawet w części nie poruszyło tak, jak odkrycie J/ψ , ale trzecia generacja stanowiła naprawdę istotną nowinę i rodziło się oczywiste pytanie: ile jeszcze ich jest? I dlaczego przyroda korzysta z takich kopii: każda generacja replikuje poprzednią.

Pozwól, drogi Czytelniku, że opiszę teraz badania, które doprowadziły do odkrycia ypsilon. W naszej grupie fizyków wywodzących się z Uniwersytetu Columbia, Fermilabu i Stony Brook (na Long Island) było kilku świetnych młodych doświadczalników. Skonstruowaliśmy urządzenie na najwyższym poziomie - spektrometr z komorami drutowymi, magnesami, hodoskopami scyntylatorów i innymi rzeczami. Nasz system zbierania danych stanowił „ostatni krzyk mody”, wykorzystywał urządzenia elektroniczne zaprojektowane przez genialnego Williama Sippacha. Wszyscy pracowaliśmy z tymi samymi wiązkami wytwarzanymi w Fermilabie. Dobrze znaliśmy problematykę i siebie nawzajem.

John Yoh, Steve Herb, Walter Innes i Charles Brown byli chyba najlepszymi asystentami, z jakimi kiedykolwiek miałem do czynienia. Oprogramowanie komputerów osiągnęło odpowiednio wysoki stopień wyrafinowania. Problem polegał na tym, że musieliśmy wychwytywać reakcje, które zdarzały się rzadziej niż raz na sto bilionów zderzeń. Ponieważ chcieliśmy zarejestrować wiele takich rzadkich dimionowych zdarzeń, trzeba było uodpornić aparaturę na wielką ilość nieistotnych dla nas cząstek. Nasz zespół zdobył unikalną wiedzę o tym, jak pracując w środowisku o wysokim poziomie promieniowania mieć detektory wciąż jeszcze zdolne do spełniania swych zadań. Nauczyliśmy się tak sprawdzać naszą aparaturę, że mogliśmy bezlitośnie eliminować fałszywe informacje, niezależnie od tego, jak sprytnie przyroda starała się nas wyprowadzić w pole.

W początkowym okresie naszego zapoznawania się z techniką, aparatura nastawiona była na łowienie par elektron-pozyton. W pewnym momencie otrzymaliśmy około 25 takich par o energiach powyżej 4 GeV. Co dziwne, 12 z nich zgrupowanych było w pobliżu 6 GeV. Wzgórek? Przedyskutowaliśmy sprawę i postanowiliśmy opublikować wyniki, sugerując możliwość istnienia cząstki o masie 6 GeV. Pół roku później, gdy liczba danych wzrosła do trzystu zdarzeń, puff! - nasz wzgórek zniknął. Zaproponowaliśmy dla cząstki kryjącej się pod fałszywym wzgórkim nazwę ypsilon, ale gdy kolejne dane zdawały się przeczyć wcześniejszym, cały incydent został ochrzczony yps-leonem.

Potem przyszedł czas na nowy eksperyment. Zainwestowaliśmy weń całą naszą wiedzę i doświadczenie: zmieniliśmy układ tarcz, osłon, ustawienie magnesów i ulepszyliśmy komory. W maju 1977 roku zaczęliśmy zbierać nowe dane. Epoka cykli doświadczalnych trwających miesiące i przynoszących w efekcie, powiedzmy, 27 czy 300 zdarzeń już minęła. W każdym tygodniu rejestrowaliśmy tysiące zdarzeń w zasadzie wolnych od zakłóceń tła. Nieczęsto się zdarza w fizyce, by nowe urządzenie pozwoliło na badanie zupełnie wcześniej nie znanej dziedziny zjawisk. Pierwszy teleskop lub mikroskop są historycznymi przykładami urządzeń, które odegrały znacznie większą rolę, ale podniecenie i radość, jakie przeżywali ich konstruktorzy, nie mogło być wiele większe od naszego. Po tygodniu dostrzegliśmy szeroki pagórek w okolicach 9,5 GeV. Wkrótce zostało to potwierdzone. John Yoh już wcześniej - podczas cyklu z trzystema

zdarzeniami - widział to zgrupowanie danych, ale zniechęcony „niewypałem” przy 6 GeV wziął tylko butelkę szampana, opatrzył ją etykietką „9,5” i schował do lodówki.

W czerwcu wypiliśmy szampana i podzieliłiśmy się z innymi nowiną, która już i tak zdążyła jakoś „wyciec” z laboratorium. Steve Herb wygłosił referat przed licznym i podnieconym audytorium. Było to pierwsze istotne odkrycie dokonane w Fermilabie. Jeszcze w tym samym miesiącu opisaliśmy dostrzeżenie szerokiego wybrzuszenia przy 9,5 GeV - z 770 zdarzeniami w rejonie maksimum odkrycie to miało solidne podstawy statystyczne. Przedtem i tak spędziliśmy wiele godzin na poszukiwaniu zaburzeń w działaniu detektora, które mogłyby symulować takie zdarzenia. Martwe obszary w detektorze? Błąd w programie komputerowym? Bezlitośnie ścigaliśmy tuziny możliwych błędów i testowaliśmy wszystkie systemy zabezpieczeń - polegają one na tym, że stawia się pytania, na które odpowiedź jest znana, i sprawdza, czy maszyna udziela sensownych odpowiedzi. W sierpniu, dzięki dodatkowym danym i bardziej wyrafinowanym analizom, określiliśmy trzy wąskie wzgórki - rodzinę ypsilonów: ypsilon, ypsilon' i ypsilon'' (Υ , Υ' i Υ''). Danych tych nie dało się wytłumaczyć na podstawie praw fizyki znanych w roku 1977. Na scenę wkracza kwark b - piękny (albo spodni)!

Nasze wnioski, że mamy do czynienia z nowym kwarkiem b , związanym ze swoim antykwarkiem, nie spotkały się ze zbyt wielką opozycją. J/ψ był mezonem składającym się z cc , a ypsilon był mezonem bb . Ponieważ masa, przy której pojawiło się wybrzuszenie, równała się prawie 10 GeV, to masa kwarka b musiała wynosić około 5 GeV. Był to zatem najcięższy ze wszystkich znanych dotąd kwarków (c miał tylko około 1,5 GeV). Takie „atomy”, jak cc i bb , występują w stanie podstawowym oraz rozmaitych stanach wzbudzonych. Nasze trzy wąskie wybrzuszenia reprezentowały właśnie stan podstawowy i dwa wzbudzone.

Jedną z miłych rzeczy było to, że my, eksperymentatorzy, mogliśmy sobie poradzić z równaniami, które opisywały ten dziwny atom, złożony z ciężkiego kwarka krążącego wokół ciężkiego antykwarka. Stare, dobre równanie Schrödingera działało zupełnie dobrze. Odświeżywszy sobie wiadomości z czasu studiów, ścigaliśmy się z teoretykami, kto pierwszy obliczy poziomy energetyczne i inne własności, które zmierzaliśmy. Nieźle się przy tym bawiliśmy... Ale wygrali oni.

Odkrycia zawsze nieco przypominają doświadczenie seksualne. Gdy mistrzowska i szybka analiza, której dokonał John Yoh, wykazała istnienie wzgórka, doznałem znanego mi już uczucia euforii zmieszanej z niepokojem, że „to nie może być prawda”. Pojawia się oczywisty impuls, żeby dzielić się tym odkryciem. Z kim? Z żonami, przyjaciółmi, dziećmi, a w tym wypadku - z Robertem Wilsonem. Jego laboratorium naprawdę potrzebowało już jakiegoś odkrycia. Zadzwoniliśmy do kolegów pracujących w Niemczech przy akceleratorze DORIS i poprosiliśmy ich, by spróbowali osiągnąć energię potrzebną do wyprodukowania ypsilona. DORIS był jedynym akceleratorem poza Fermilabem, który mógł osiągnąć tę energię. Udało im się z najwyższym wysiłkiem. Tym większa była nasza radość (i niemiała ulga). Później dopiero zaczynasz myśleć o nagrodach: czy to wystarczy?

W związku z tym odkryciem przeżyliśmy szczególnie ciężkie chwile, bo po tygodniu zbierania danych przeszkodził nam pożar. W maju 1977 roku zapaliło się urządzenie - dostarczone bez wątplenia przez taniego dostawcę - mierzące prąd płynący w magnesach. Ogień rozprzestrzenił się aż do instalacji elektrycznej. Gdy ona płonie, wytwarza się gazowy chlor, a kiedy usłużni strażacy wpadną z węzami i wszystko spry-

skają wodą, powstaje atmosfera przesycona chlorowodorem. Kwas ten osiada na wszystkich kartach z tranzystorami i zaczyna je powoli zżerać.

Ratowanie sprzętu elektronicznego jest swego rodzaju sztuką. Przyjaciele z CERN opowiadali mi kiedyś o podobnym pożarze, zadzwoniłem więc do nich, szukając ratunku. Podano mi nazwisko i numer telefonu holenderskiego eksperta od ratowania sprzętu, który pracował w Hiszpanii dla niemieckiej firmy. Pożar wydarzył się w sobotę i właśnie była niedziela, godzina trzecia nad ranem. Zadzwoniłem do niego i od razu udało mi się go znaleźć. Tak, może przyjechać, dotarłby do Chicago we wtorek, a samolot towarowy z Niemiec mógłby przywieźć chemikalia w środę. Ale potrzebna mu jest wiza amerykańska, której załatwienie trwa zazwyczaj dziesięć dni. Zadzwoniłem do ambasady amerykańskiej w Madrycie i alarmowałem: „Energia atomowa, bezpieczeństwo państwa, sprzęt o wartości milionów dolarów zagrożony...” Połączono mnie z ambasadorem, na którym cała moja przemowa nie zrobiła najmniejszego wrażenia. Ożywił się dopiero, gdy przedstawiłem się jako profesor z Uniwersytetu Columbia. „Columbia? Czemu pan od razu tego nie powiedział? Jestem z rocznika 56! - zawołał. - Proszę do mnie przysłać tego swojego człowieka”.

We wtorek przyjechał pan Jesse; obwąchał 900 kart, z których każda miała około 50 tranzystorów (technologia z roku 1975). W środę przybyły chemikalia. Podczas odprawy celnej piętrzyły się trudności, ale dopomógł nam Departament Energii. We czwartek mieliśmy już coś w rodzaju linii produkcyjnej: fizycy, sekretarki, żony, narzeczone - wszyscy zanurzali karty w sekretnym roztworze A, potem w roztworze B, potem suszyli je w strumieniu czystego azotu, potem czyścili pędzelkiem z wielbłądziego włosa. Spodziewałem się, że będziemy musieli dodać do rytuału ciche wymawianie holenderskich zaklęć, ale to okazało się zbędne.

Jesse był zapalonym kawalerzystą. Mieszkał w Hiszpanii po to tylko, by móc trenować z hiszpańską kawalerią. Gdy dowiedział się, że mam trzy konie, urwał się z laboratorium, by jeździć z moją żoną i członkami klubu jeździeckiego Fermilabu. Będąc prawdziwym ekspertem, wszystkim udzielał wskazówek. Wkrótce jeźdźcy przemierzający prerię wymieniali uwagi na temat susów, pasaży i innych manewrów kawaleryjskich. Dzięki temu dysponujemy teraz wyszkoloną kawalerią zdolną do obrony Fermilabu, gdyby wrogim siłom z CERN czy SLAC przyszło do głowy zaatakować nas konno.

W piątek instalowaliśmy karty, sprawdziliśmy uprzednio każdą z nich. W sobotę rano wszystko już normalnie funkcjonowało. Błyskawiczna analiza przeprowadzona kilka dni później wykazała, że wzgórek ciągle tkwił na swoim miejscu. Jesse został z nami przez dwa tygodnie; jeździł konno, udzielał porad w sprawie zapobiegania pożarom i wszystkim oczarował. Nie przysłał nam nawet rachunku, zapłaciliśmy tylko za chemikalia. W ten oto sposób świat otrzymał trzecią generację. Sama nazwa *bottom* - dno - sugeruje, że musi być *top* - wierzch, szczyt. (Jeśli ktoś woli *beauty* - piękno - to towarzyszy mu *truth* - prawda). Nowa tabela układu okresowego wyglądała teraz następująco:

Pierwsza generacja	Druga generacja	Trzecia generacja
KWARKI		
górnny (<i>u</i>)	powabny (<i>c</i>)	wierzchni (<i>t</i>)
dolny (<i>d</i>)	dziwny (<i>s</i>)	spodni (<i>b</i>)

LEPTONY

neutrino elektro- nowe (ν_e) elektron (e)	neutrino mionowe (ν_μ) mion (μ)	neutrino tau (ν_τ) tau (τ)
---	---	---

W chwili gdy to piszę, nie znaleziono jeszcze kwarka t , nie przyszpilono jeszcze w badaniach eksperymentalnych neutrina taonowego, ale nikt już nie wątpi w ich istnienie. W ciągu lat składano w Fermilabie rozmaite propozycje przeprowadzenia trzyneutrinowego eksperymentu, ale jak dotąd wszystkie zostały odrzucone, gdyż byłyby szalenie kosztowne. Zauważ, drogi Czytelniku, że istnienie zgrupowania cząstek zajmującego lewy dolny róg tabeli zostało udowodnione w dwuneutrinowym eksperymencie w 1962 roku. Kwark b i lepton τ były tylko kosmetycznymi poprawkami, wprowadzonymi do modelu pod koniec lat siedemdziesiątych.

Po dodaniu do tej tabeli rozmaitych sił, stanowi ona zwięzłe podsumowanie wszystkich danych otrzymanych we wszystkich akceleratorach świata, począwszy od czasu, kiedy Galileusz spuszczał na ziemię kulki o różnych ciężarach z niezupełnie prostej wieży w Pizie. Tabelę tę nazywamy modelem standardowym albo standardowym obrazem, albo standardową teorią. Zapamiętać!

W roku 1993 model ten jest traktowany w fizyce cząstek elementarnych jako dogmat. Urządzenia pracujące w latach dziewięćdziesiątych - głównie tawatron w amerykańskim Fermilabie i akcelerator pozytonów i elektronów (o nazwie LEP) w europejskim CERN - oraz tysiące eksperymentatorów koncentrują swe wysiłki na tym, co może wykraczać poza model standardowy. Mniejsze urządzenia, takie jak DESY, akcelerator w Cornell i Brookhaven, SLAC i KEK (w Tsukubie, w Japonii) także pracują nad wzbogacaniem naszej wiedzy o licznych parametrach modelu standardowego i próbują znaleźć tropy wiodące ku jeszcze głębszej rzeczywistości.

Jeszcze wiele pozostaje do zrobienia. W przyrodzie występują tylko dwa rodzaje kombinacji kwarków: (1) kwark i antykwark (qq), czyli mezony, oraz (2) trzy kwarki (qqq), czyli bariony. Możemy się teraz pobawić i tworzyć takie hadrony, jak uu , uc , ut , oraz uc , ut , ds , db ... Wesolej zabawy! A także uud , ccd , ttd ... Możliwe są setki kombinacji (ktoś nawet wie ile). Każda z nich reprezentuje cząstkę, która albo została wykryta i umieszczona w tabeli, albo czeka na odkrycie. Mierząc czasy życia i sposoby rozpadu najróżniejszych cząstek, dowiadujemy się coraz więcej o silnym oddziaływaniu między kwarkami, przenoszonym przez gluony, a także o własnościach oddziaływania słabego. Mnóstwo roboty. Inne ważne zagadnienie związane jest z „prądami neutralnymi” i odgrywa kluczową rolę w naszej historii tropienia Boskiej Cząstki.

JESZCZE O ODDZIAŁYWANIU SŁABYM

W latach siedemdziesiątych zebrano mnóstwo danych o rozpadach nietrwałych hadronów. Zjawisko to stanowi przykład reakcji, w której uczestniczą kwarki tworzące hadron: kwark u zmienia się w albo na odwrót. Jeszcze bardziej pouczające były wieloletnie eksperymenty z rozpraszaniem neutrin. Zebrane dane świadczyły o istnieniu trzech masywnych nośników oddziaływania słabego: W^+ , W^- i Z^0 . Masa tych cząstek musi być spora, gdyż oddziaływanie słabe ma bardzo niewielki zasięg, nie większy niż 10^{-19} metra. Teoria kwantowa nakłada ściśle ograniczenia, według których zasięg oddziaływania

jest odwrotnie proporcjonalny do masy cząstki przenoszącej oddziaływanie. Siła elektromagnetyczna sięga w nieskończoność (choć słabnie wraz ze wzrostem odległości), a jej nośnikiem jest foton o zerowej masie.

Ale dlaczego aż trzy nośniki? Dlaczego potrzebne są trzy cząstki - jedna naładowana dodatnio, druga ujemnie, a trzecia obojętna - by mogło rozprzestrzeniać się pole, które wywołuje zmiany rodzaju kwarków? Aby to wyjaśnić, będziemy musieli zająć się trochę fizyczną księgowością i przypilnować, żeby po obu stronach strzałki (\rightarrow) wszystko się zgadzało; również znaki ładunku elektrycznego. Jeśli cząstka elektrycznie obojętna rozpada się na cząstki naładowane, to ładunki dodatnie muszą zrównoważyć ładunki ujemne.

Rozpad neutronu na proton - typowy proces zachodzący za pośrednictwem oddziaływania słabego - przebiega następująco:

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \nu_e$$

Już to widzieliśmy: neutron rozpada się na proton, elektron i antyneutrino elektronowe. Zauważ, drogi Czytelniku, że dodatni ładunek protonu został zrównoważony ujemnym ładunkiem elektronu, a antyneutrino jest obojętne. Wszystko się zgadza. Ale to jest bardzo powierzchowny opis tej reakcji - jak obserwowanie jajka, z którego ma się wylęgnać sójka - gdyż nie wiadomo, co się dzieje w środku. Neutron jest w rzeczywistości konglomeratem trzech kwarków - jednego u oraz dwóch d (udd); proton składa się z dwóch u i jednego d (uud). Toteż gdy neutron rozpada się na proton, kwark d zmienia się w kwark u . Dlatego bardziej pouczające jest zajrzenie do wnętrza neutronu i opisanie tego, co dzieje się z kwarkami. W języku kwarków tę samą reakcję zapisujemy następująco:

$$d \rightarrow u + e^- + \nu_e$$

A zatem kwark d w neutronie zmienia się w u i emituje przy tym elektron oraz antyneutrino elektronowe. Jednak to też jest nadmiernie uproszczona wersja rzeczywistych wydarzeń! Elektron i antyneutrino nie pochodzą bezpośrednio z kwarka d . Zachodzi reakcja pośrednia, w której uczestniczy W . Teoria kwantowa oddziaływania słabego zapisuje więc proces rozpadu neutronu w dwóch etapach:

$$(1) d^{1/3} \rightarrow W + u^{2/3},$$

a potem

$$(2) W \rightarrow e^- + \nu_e.$$

Zauważ, drogi Czytelniku, że kwark dolny rozpada się najpierw na W i kwark u . Dopiero potem W rozpada się na elektron oraz antyneutrino elektronowe. Cząstka W pośredniczy w przekazywaniu oddziaływania słabego i uczestniczy w reakcjach rozpadu. W opisanej reakcji W musi mieć ładunek ujemny, by zrównoważyć zmianę ładunku towarzyszącą przemianie kwarka u w d . Jeśli do ładunku kwarka u , równego $+2/3$, dodamy ładunek cząstki W , równy -1 , otrzymamy $-1/3$, czyli ładunek kwarka d , który zapoczątkował całą tę reakcję. Wszystko się zgadza.

W jądrze kwarki u mogą także ulegać rozpadowi na kwark d , przekształcając proton w neutron. W języku kwarków proces ten opisujemy następująco: $u \rightarrow W^+ + d$, a potem: $W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$. W tym wypadku potrzebujemy dodatniej cząstki W , by zbilansować zmianę ładunku. Z tego właśnie powodu obserwowane rozpady kwarków - poprzez przemianę protonu w neutron i na odwrót - wymagają istnienia zarówno W , jak i W^+ . Ale to jeszcze nie wszystko.

Eksperymenty przeprowadzone w połowie lat siedemdziesiątych z udziałem wiązek neutrin pozwoliły stwierdzić obecność tak zwanych prądów neutralnych, które z ko-

lei wymagały istnienia ciężkiego, neutralnego nośnika oddziaływania. Bodźcem do przeprowadzenia tych doświadczeń były prace takich teoretyków, jak Glashow, którzy pracowali nad unifikacją wszystkich rodzajów oddziaływań. Uczeni ci nie chcieli się pogodzić z tym, że do przenoszenia oddziaływania słabego wystarczą tylko cząstki naładowane. Rozpoczęto więc polowanie na prądy neutralne.

Prądem może być w zasadzie wszystko, co płynie. Prąd wody płynie w rzece lub w rurze wodociągowej. Prąd elektronów płynie w przewodzie lub w roztworze. Cząstki W i W^* pośredniczą przy przepływie cząstek z jednego stanu do drugiego. Pojęcie prądu w odniesieniu do tych cząstek zrodziło się zapewne na skutek potrzeby śledzenia ładunków elektrycznych. W^* pośredniczy w przepływie prądu dodatniego, W zaś w przepływie prądu ujemnego. Prądy te można badać w zachodzących spontanicznie słabych rozpadach, takich jak te, które nieco wcześniej opisałem. Mogą one jednak także powstawać w akceleratorach - podczas zderzeń wiązek neutrin, które nauczono się uzyskiwać dzięki dwuneutrinowemu eksperymentowi w Brookhaven.

Przyjrzyjmy się, co się dzieje, gdy neutrino mionowe - które odkryliśmy w Brookhaven - zderza się z protonem; a dokładniej mówiąc, z kwarkiem u w protonie. Powstaje wówczas kwark d i dodatni mion:

$$\nu_{\mu} + u^{+2/3} \rightarrow d^{+1/3} + \mu^{+1}.$$

Czyli, antyneutrino mionowe plus kwark u przechodzi w kwark d plus dodatni mion. Rzecz się sprowadza do tego, że podczas zderzenia neutrina i kwarka u ten ostatni zmienia się w kwark d , a neutrino - w mion. Podobnie jak w poprzednim przykładzie, teoria oddziaływania słabego mówi nam, że reakcja ta przebiega w dwóch etapach:

$$(1) \nu_{\mu} \rightarrow W + \mu^{+}$$

$$(2) W + u \rightarrow d.$$

Antyneutrino zderza się z kwarkiem u i opuszcza miejsce zderzenia jako mion. Kwark u zmienia się w d , a w całej reakcji pośredniczy W . Mamy więc prąd ujemny. Już w roku 1955 teoretycy zauważyli (między innymi nauczyciel Glashowa, Julian Schwinger), że możliwy jest także prąd neutralny:

$$\nu_{\mu} + u \rightarrow u + \nu_{\mu}.$$

Co się dzieje? Mamy neutrina mionowe i kwarki u po obu stronach reakcji. Neutrino odbija się od kwarka u , ale wyłania się z reakcji jako neutrino, a nie mion, jak w poprzednim przykładzie. Kwark u doznaje szturchnięcia, ale nadal pozostaje kwarkiem u . Ponieważ jest on częścią protonu (albo neutronu), cząstka ta pozostaje nienaruszona. Gdybyśmy mieli powierzchownie przyjrzeć się tej reakcji, ujrzelibyśmy neutrina mionowe uderzające w proton i odbijające się od niego bez szwanku. Ale rzecz jest bardziej złożona. W poprzedniej reakcji w metamorfozie kwarka u w kwark d (albo na odwrót) pośredniczyło dodatnie albo ujemne W . Tutaj neutrino musi wysłać cząstkę przenoszącą oddziaływanie, żeby stuknąć kwark u . Gdy próbujemy zapisać tę reakcję, jasnym się staje, że ta wirtualna cząstka musi być elektrycznie obojętna.

Reakcja ta przypomina sposób, w jaki rozumiemy powstawanie siły elektromagnetycznej, powiedzmy, między dwoma protonami. Mamy wtedy wymianę obojętnej cząstki wirtualnej - fotonu. Ta wymiana jest źródłem opisywanej przez prawo Coulomba siły, która pozwala jednemu protonowi popchnąć drugi proton. Podobieństwo to jest nieprzypadkowe. Poszukiwacze Wielkiej Unifikacji (mam tu na myśli Glashowa i jego kolegów) potrzebowali takiego procesu, jeśli zjednoczenie oddziaływania słabego i elektromagnetycznego miało się kiedykolwiek dokonać.

Tak więc rzucono nam, eksperymentatorom, wyzwanie: czy możemy znaleźć reakcje, w których neutrino zderzają się z jądrami i nadal pozostają neutronami? Najważniejszą częścią takiego eksperymentu jest zaobserwowanie wpływu tych neutronów na uderzone jądro. Istniały pewne niejednoznaczne dane, wskazujące na to, że reakcje takie zachodzą w naszym dwumionowym eksperymencie w Brookhaven. Mell Schwartz nazywał je „klopami”: neutralna cząstka wchodzi do nich, po czym taka sama z nich wychodzi. Nie ma zmiany ładunku elektrycznego. Uderzone jądro rozpada się, ale w stosunkowo niskoenergetycznej wiązce neutronów pojawia się niewiele energii - stąd właśnie wzięło się określenie Schwartza. Prądy neutralne. Nie pamiętam już, dlaczego obojętną cząstkę przenoszącą oddziaływanie nazwano Z^0 (mówimy zet zero), a nie W^0 . Ale jeśli chcesz, drogi Czytelniku, zaimponować znajomym, to możesz używać terminu „prądy neutralne”, fantazyjnej nazwy stworzonej dla wyrażenia idei, że obojętna cząstka wirtualna jest niezbędna w niektórych procesach zachodzących z udziałem oddziaływania słabego.

Pora na przyspieszenie oddechu

Powtórzmy, co sobie myśleli teoretycy. Fermi jako pierwszy opisał w latach trzydziestych słabe oddziaływanie. Formułując swą teorię, odwoływał się w części do kwantowej teorii pola elektromagnetycznego, czyli do elektrodynamiki kwantowej (ang. *quantum electrodynamics*, QED). Fermi chciał sprawdzić, czy dynamika nowej siły nie naśladuje dynamiki siły znanej od dawna - oddziaływania elektromagnetycznego. Przypomnijmy sobie, że zgodnie z QED pole rozprzestrzenia się dzięki cząstkom przenoszącym oddziaływanie - fotonom. Dlatego też teoria słabego oddziaływania Fermiego powinna także zawierać takie cząstki. Tylko jak one wyglądają?

Zerowa masa fotonu jest przyczyną znanego prawa odwrotnych kwadratów dla długozasięgowych sił elektromagnetycznych. Oddziaływanie słabe ma bardzo krótki zasięg, dlatego Fermi po prostu nadał cząstkom przenoszącym to oddziaływanie nieskończenie wielką masę. Logiczne. W późniejszych wersjach teorii, szczególnie w sformułowaniu Schwingera, wprowadzono ciężkie cząstki W jako nośniki oddziaływania. Podobnie postąpiło kilku innych teoretyków: Lee, Yang, Gell-Mann... Nie cierpię przypisywać zasługi poszczególnym teoretykom, bo denerwuję tym wielu pozostałych. Jeśli od czasu do czasu zaniedbuję cytowania jakiegoś teoretyka, to nie przez zapomnienie, tylko dlatego, że go nie lubię.

Doszliśmy teraz do najtrudniejszego miejsca: w kompozycji muzycznej stosuje się powracający motyw, który wprowadza jakąś postać czy ideę, na przykład motyw przewodni w utworze *Piotruś i wilk* uprzedza nas o pojawieniu się Piotrusia na scenie. Być może w naszym wypadku bardziej stosowny byłby posępny temat na wolonczelę, poprzedzający pojawienie się wielkiego białego rekina w *Szczękach*. Niniejszym mam zamiar zagrać pierwsze tony wprowadzające Boską Cząstkę, ale nie chcę zrobić tego zbyt wcześnie. Lepiej powoli.

Pod koniec lat sześćdziesiątych i na początku siedemdziesiątych kilku młodych teoretyków zaczęło studiować kwantową teorię pola w nadziei, że uda im się powtórzyć sukces QED także w stosunku do innych rodzajów oddziaływań. Może przypominasz sobie, Drogi Czytelniku, że eleganckiemu rozwiązaniu problemu oddziaływania-na-odległość towarzyszyły pewne problemy obliczeniowe. Wielkości, które powinny być ma-

łe lub mierzalne, wyłaniały się z równań jako wartości nieskończone - a to naprawdę dużo. Feynman i jego koledzy wymyślili procedurę renormalizacji, by pozbyć się nieskończoności w mierzonych wielkościach, takich jak ładunek albo masa elektronu. Mówi się, że QED jest teorią renormalizowalną, co oznacza, że można się jakoś pozbyć tych obezwładniających nieskończoności. Jednak próby zastosowania kwantowej teorii pola do innych rodzajów oddziaływań zakończyły się totalnym fiaskiem. Nic równie okropnego nie zdarzyło się nigdy tak miłym facetom. W obliczeniach dla innych oddziaływań nieskończoności po prostu się rozszalały i wszystko tak się pogmatwało, że zaczęto kwestionować użyteczność kwantowej teorii pola w ogóle. Niektórzy teoretycy powtórnie przebadali QED, by zobaczyć, dlaczego ta teoria działa (w wypadku siły elektromagnetycznej), choć inne - nie.

QED - superdokładna teoria, która pozwoliła obliczyć wielkość momentu magnetycznego z dokładnością do jedenastu miejsc po przecinku - należy do grupy teorii, zwanych teoriami z cechowaniem. „Cechowanie” oznacza tutaj skalę, w tym znaczeniu, w jakim mówimy o skali H_0 modeli wagonów kolejowych. Teoria cechowania wyraża abstrakcyjny rodzaj symetrii występującej w przyrodzie, która to symetria jest bardzo blisko związana z faktami eksperymentalnymi. W ważnej pracy z roku 1954 C. N. Yang i Robert Mills podkreślali potęgę symetrii cechowania. Zamiast postulować istnienie nowych cząstek, które wyjaśniłyby obserwowane zjawiska, poszukiwano symetrii, które pozwoliłyby te zjawiska przewidywać. Rzeczywiście, symetria cechowania zastosowana do QED pozwalała otrzymać siły elektromagnetyczne, gwarantowała zachowanie ładunku i bez żadnych dodatkowych wysiłków zapewniała ochronę przed najuczulliwszymi nieskończonościami. Teorie z symetrią cechowania są renormalizowalne. (Powtarzaj to zdanie tak długo, aż będziesz w stanie wymówić je bez zajknięcia i rzuć je kiedyś od niechcenia przy obiedzie). Ale teorie z cechowaniem wymagają istnienia cząstek cechowania. Są nimi właśnie cząstki przenoszące oddziaływania: fotony w wypadku siły elektromagnetycznej. Cząstki W dla oddziaływania słabego. A dla silnego? Oczywiście gluony.

Wielu z najlepszych i najzdolniejszych teoretyków zabrało się do pracy nad słabym oddziaływaniem z dwóch, nie, z trzech powodów. Pierwszy sprowadzał się do tego, że oddziaływaniu słabemu towarzyszyło mnóstwo nieskończoności i nie wiadomo było, jak można sformułować teorię z cechowaniem. Drugim powodem było dążenie do osiągnięcia wielkiej unifikacji, gorąco popierane przez Einsteina i bliskie sercom młodych teoretyków. Wszyscy skupiali się na próbach zjednoczenia oddziaływania słabego i elektromagnetycznego. Było to nader trudne zadanie, ponieważ oddziaływanie słabe jest nieporównanie słabsze od elektromagnetycznego, ma znacznie krótszy zasięg i nie zachowuje symetrii takich jak parzystość. Poza tym oba te rodzaje sił są całkiem takie same!

Trzeci powód to sława i chwała, która miała opromienić tego, kto rozwiąże zagadkę. W wyścigu udział wzięli: Steven Weinberg, wówczas pracujący w Princeton, Sheldon Glashow (obaj byli członkami klubu miłośników literatury fantastycznonaukowej), Abdus Salam, pakistański geniusz z Imperial College w Anglii, Martinus Veltman z Utrechtu i jego student Gerard 't Hooft. Scenę przygotowali dla nich bardziej wiekowi teoretycy (dobrze po trzydziestce): Schwinger, Gell-Mann, Feynman i jeszcze całe mnóstwo innych. Jeffrey Goldstone i Peter Higgs grali znaczące partie na pikolo.

Darujemy sobie szczegółową relację z teoretycznej wymiany ciosów, która trwała od roku 1960 aż do połowy lat siedemdziesiątych. Stwierdzimy tylko, że ostatecznie

udało się sformułować renormalizowalną teorię oddziaływania słabego. W tym samym czasie okazało się, że jej mariaż z QED, czyli z teorią oddziaływania elektromagnetycznego, zapowiada się nie najgorzej. Żeby do tego mariażu doprowadzić, trzeba było stworzyć dla kombinowanego oddziaływania elektroslabego jedną rodzinę cząstek przenoszących oddziaływanie: W , W^+ , Z^0 i foton. Przypomina to jakąś mieszaną rodzinę, gdzie przyrodnie rodzeństwo z poprzednich małżeństw rodziców próbuje mieszkać razem w maleńkim mieszkaniu w zgodzie i harmonii, dzieląc wspólną łazienkę. Nowa ciężka cząstka Z^0 pomogła spełnić warunki stawiane przez teorię z cechowaniem, a cała czwórka spełniała wszystkie wymagania związane z łamaniem parzystości, także słabość oddziaływania słabego. Niemniej, na tym wczesnym etapie (przed rokiem 1970) nie udało się jeszcze zaobserwować cząstek W i Z , ani żadnej reakcji, którą można by przypisać działaniu cząstki Z^0 . I jak tu mówić o zjednoczonym oddziaływaniu elektroslabym, kiedy każde dziecko w laboratorium może wykazać ogromne różnice dzielące zachowanie obu tych sił?

Jeden z problemów, z którym każdy z teoretyków musiał się samotnie zmierzyć w swym gabinecie, w domu czy na pokładzie samolotu, dotyczył tego, że oddziaływanie słabe, mające bardzo krótki zasięg, wymagało ciężkich nośników, choć teoria cechowania nie przewidywała ich istnienia; jej gwałtowny sprzeciw ujawnił się w postaci nieskończoności: ostrza sztyletu przenikającego intelektualne trzewia teoretyka. Poza tym, w jaki sposób te trzy cząstki: W^+ , W i Z^0 , mają współtworzyć szczęśliwą rodzinę z pozabawionym masy fotonem?

Peter Higgs z Uniwersytetu w Manchesterze wpadł na rozwiązanie tej zagadki - zaproponował jeszcze jedną cząstkę (pomówimy o niej wkrótce) - z którego skwapliwie skorzystał Steven Weinberg, wówczas pracujący na Harvardzie, a obecnie na Uniwersytecie Stanu Teksas. Jasne, że my, hydraulicy laboratoryjni, nie widzimy żadnej symetrii między siłami słabą i elektromagnetyczną. Teoretycy wiedzą o tym, ale rozpaczliwie pragną, by symetria pojawiła się w podstawowych równaniach. Musimy więc znaleźć sposób, żeby wprowadzić symetrię, a potem złamać ją, gdy szczegółowe rozwiązania tych równań przewidują rezultaty eksperymentów. Świat jest doskonały w ogóle, ale staje się niedoskonały, gdy dochodzimy do szczegółów, czyż nie? Chwileczkę, nie ja to wymyśliłem.

Oto jak to wszystko działa.

Weinberg, wykorzystując prace Higgsa, odkrył mechanizm, za pomocą którego pierwotny zestaw cząstek wirtualnych o zerowej masie, reprezentujących zunifikowane oddziaływanie elektroslabe, zyskiwał masę na skutek pożerania - mówiąc bardzo metaforycznie - niepotrzebnych składników teorii. Zgoda? Nie? Zastosujmy pomysł Higgsa, by zniszczyć symetrię. I cóż widzimy? Cząstki W i Z zyskały masę, foton pozostał niezmienny, a z popiołów zniszczonej zunifikowanej teorii wyłoniły się oddziaływania słabe i elektromagnetyczne. Masywne cząstki W i Z dreptały w miejscu, tworząc radioaktywność cząstek i uczestnicząc w reakcjach, które od czasu do czasu przeszkadzają neutronom w swobodnym przemierzaniu Wszechświata, podczas gdy fotony dały początek elektryczności, którą wszyscy znamy, kochamy i za którą płacimy. Ha! Radioaktywność (oddziaływanie słabe) i światło (elektromagnetyzm) zostały elegancko (?) połączone. W gruncie rzeczy idea Higgsa nie zniszczyła symetrii, tylko ją ukryła.

Pozostało do rozstrzygnięcia jedno pytanie. Dlaczego ktokolwiek miałby przejmować się całym tym matematycznym bełkotem? No cóż, Tini Veltman i Gerard 't Hooft opracowali ten sam problem, może nawet bardziej dogłębnie, i wykazali, że jeśli zasto-

suje się tę (wciąż tajemniczą) sztuczkę Higgsa, by złamać symetrię, znikają wszystkie nieskończoności, które w charakterystyczny sposób na wskroś przesywały całą teorię. Teoria Isniła pełnym blaskiem. Zrenormalizowana.

Jeśli chodzi o matematyczną stronę zagadnienia, to w równaniach pojawił się cały zestaw wyrazów o znakach dobranych w ten sposób, że kasowały się te, które tradycyjnie miały nieskończoną wartość. Ale było ich tak dużo! 't Hooft podszedł do zagadnienia systematycznie i napisał program komputerowy. Pewnego lipcowego dnia w roku 1971 przyglądał się wydrukowi, podczas gdy komputer odejmował po kolei jedno skomplikowane wyrażenie całkowite od drugiego. Każdy z tych wyrazów obliczony z osobna był nieskończony. Na wysuwającym się z maszyny papierze pojawiały się rezultaty komputerowych obliczeń, wyraz za wyrazem. Wynik zawsze był ten sam: 0. Wszystkie nieskończoności zniknęły. Była to część pracy doktorskiej 't Hoofta i należy ją, razem z pracą de Broglie'a, zapisać w historii nauki jako pracę epokową.

Znalezienie zet zero

Dość teorii. Trzeba przyznać, że to skomplikowane sprawy. Jeszcze do nich wrócimy. Żelazna zasada pedagogiczna, której trafność miałem okazję wypróbować w ciągu czterdziestu lat pracy ze studentami - od pierwszego roku po asystentów - mówi, że nawet jeśli 97 procent materiału wykładu jest niezrozumiałe, to powtórzenie go spowoduje, iż wyda się dziwnie znajomy.

Jakie konsekwencje dla realnego świata płynęły ze wszystkich tych teorii? Wielkie konsekwencje będą musiały poczekać, aż dojdziemy do rozdziału ósmego. W roku 1970 bezpośrednia konsekwencja dla doświadczalników sprowadzała się do tego, że aby cała teoria miała sens, musi istnieć Z^0 . A jeśli Z^0 jest cząstką, to powinniśmy ją znaleźć. Z^0 jest neutralne jak jego przyrodni brat foton, ale w odróżnieniu od pozbawionego masy fotonu Z^0 miało być bardzo ciężkie; tak jak jego rodzeństwo - bliźnięta W . Nasz cel jawił się bardzo wyraźnie: szukać czegoś, co przypomina ciężki foton.

W wielu eksperymentach, w tym także w kilku przeprowadzonych przeze mnie, poszukiwaliśmy śladów cząstek W . Nie zdołaliśmy ich znaleźć i stwierdziliśmy, że ten brak jest zrozumiały jedynie pod warunkiem, że masa W przekracza 2 GeV. Gdyby była mniejsza, cząstki te ujawniłyby się w drugiej serii naszych eksperymentów z neutronami w Brookhaven. Szukaliśmy w zderzeniach protonów. Wciąż brak W . Teraz już ich masa musiała przekraczać 5 GeV. Teoretycy też mieli swoje opinie na temat własności W i wciąż zwiększali ich masę, aż pod koniec lat siedemdziesiątych powiedzieli, że wynosi ona około 70 GeV. O wiele za dużo, jak na możliwości maszyn w tamtej epoce.

Ale wróćmy do Z^0 . Neutrino uderza w jądro. Jeśli wyśle przy tym cząstkę W^+ (antyneutrino wysła W), zmieni się w mion, ale jeśli może wysłać Z^0 , to nadal pozostanie sobą - neutrinem. Jak już wspominałem, ponieważ wtedy nie zmienia się ładunek na linii leptonów, nazywamy tę przemianę prądem neutralnym.

Trudno przeprowadzić prawdziwy eksperyment, który pozwoliłby wykryć prąd neutralny: na początku mamy niewidzialne neutrino, równie niewidzialne neutrino na końcu, a do tego garść hadronów pochodzących z uderzonego nukleonu. Zaobserwowanie w detektorze samych hadronów na nikim nie zrobi żadnego wrażenia, bo to samo mógłby spowodować jakiś neutron tła. W roku 1971 w CERN zaczęła działać przy wiązce neutronowej gigantyczna komora pęcherzykowa, zwana Gargamelle. Akcelerator PS o mo-

cy 30 GeV wytwarzał neutrino o energii 1 GeV. Już w roku 1972 grupa z CERN znalazła się na tropie bezmionowych zdarzeń. Jednocześnie nowe urządzenie w Fermilabie posyłało neutrino o energii 50 GeV w kierunku ogromnego, elektronicznego detektora, przy którym pracowali David Cline (Uniwersytet Stanu Wisconsin), Alfred Mann (Uniwersytet Stanu Pensylwania) i Carlo Rubbia (Harvard, CERN, północne Włochy, Alitalia...).

Nie sposób w kilku słowach streścić historię tego odkrycia. Jest ona pełna „burzy i naporu”, ludzkich ambicji i zagadnień z zakresu socjopolityki nauki. Pominiemy to wszystko i po prostu powiemy, że w roku 1973 grupa Gargamelle oznajmiła, cokolwiek bez przekonania, że zaobserwowała prąd neutralny. W Fermilabie, zespół Cline-Mann-Rubbia też miał raczej takie sobie dane. Procesy tła istotnie zaciemniały obraz, a sygnał, jaki udało im się uzyskać, nie był szczególnie imponujący. Oznajmili, że znaleźli prąd neutralny, potem się wycofali. Potem znów oznajmili. Jakiś żartowniś nazwał ich odkrycie „zmiennym prądem neutralnym”.

Podczas międzynarodowej konferencji rochesterskiej, która w 1974 roku odbywała się w Londynie, wszystko już było jasne: w CERN odkryto prąd neutralny, a grupa z Fermilabu dysponowała przekonującymi danymi na potwierdzenie tego odkrycia. Dane wskazywały na to, że „coś jakby Z^0 ” musiało istnieć. Ale jeśli chcemy trzymać się ogólnie przyjętych reguł postępowania, to musimy przyznać, że dopiero dziewięć lat później bezpośrednio udowodniono istnienie tej cząstki, choć już w roku 1974 potwierdzono istnienie prądów neutralnych. Zaslugę odkrycia Z^0 w 1983 roku przypisuje się CERN. Masa? Zet zero jest naprawdę ciężkie: 91 GeV.

Uwaga na marginesie: do połowy roku 1992 urządzenie LEP pracujące w CERN zarejestrowało już ponad dwa miliony cząstek zet zero, zbieranych przez cztery ogromne detektory. Badania procesu tworzenia się tych cząstek, a następnie ich rozpadu dostarczają ogromnych ilości danych, którymi zajmuje się niemal 1400 fizyków. Przypomnij sobie, drogi Czytelniku, że kiedy Ernest Rutherford odkrył cząstki α , najpierw wyjaśnił ich naturę, a potem zaczął ich używać jako narzędzi badawczych i dzięki temu odkrył jądro. My zrobiliśmy to samo z neutrinami. Wiązki neutrin stały się narzędziem pożytecznym w poszukiwaniach cząstek przenoszących oddziaływanie, w badaniach kwarków i wielu innych rzeczach. Wczorajsza fantazja dziś jest odkryciem, a jutro - przyrzędem.

JESZCZE O ODDZIAŁYWANIU SILNYM: GLUONY

W latach siedemdziesiątych brakowało nam jeszcze jednego odkrycia do zwieńczenia modelu standardowego. Mieliśmy już kwarki, ale były tak mocno związane ze sobą, że nie istniało coś takiego jak swobodny kwark. Nie wiedzieliśmy, jaki mechanizm może za tym stać. Wezwaliśmy na pomoc kwantową teorię pola, ale znów rezultaty nie były zadowalające. Bjorken zinterpretował pierwsze dane uzyskane w eksperymencie na Uniwersytecie Stanforda, w którym elektrony odbijały się od kwarków w protonie. Charakter rozpraszania wskazywał na to, że nieznaną siłą wiążącą kwarki ze sobą jest zaskakująco słaba, gdy te znajdują się bardzo blisko siebie.

To był niesamowity rezultat, ponieważ także i tu chciałoby się zastosować symetrię cechowania. Teorie z cechowaniem mogły przewidzieć takie sprzeczne z intuicją zjawisko, kiedy silne oddziaływanie staje się bardzo słabe przy małych odległościach i coraz mocniejsze, gdy kwarki oddalają się od siebie. Proces ten, odkryty przez kilku

młodzieńców: Davida Politzera z Harvardu oraz Davida Grossa i Franka Wilczka z Princeton, nosi nazwę, której pozazdrościłby mu każdy polityk - asymptotyczna swoboda. „Asymptotyczna” to z grubsza znaczy taka, która „zbliża się coraz bardziej, ale nigdy nie dotyka”. Kwarki mają taką właśnie asymptotyczną swobodę. Oddziaływanie silne robi się coraz słabsze, w miarę jak kwarki zbliżają się do siebie. Oznacza to, że gdy kwarki są blisko siebie, paradoksalnie, zachowują się tak, jakby były swobodne, ale gdy oddalają się od siebie, łącząca je siła robi się efektywnie coraz silniejsza. Mała odległość implikuje wysoką energię, a więc silne oddziaływanie słabnie przy wysokich energiach. W wypadku oddziaływania elektromagnetycznego jest wręcz przeciwnie. („Wszystko robi się coraz dziwniejsze” - powiedziała Alicja). Co ważniejsze, oddziaływanie silne potrzebuje cząstek przenoszących, tak samo jak i inne siły. Gdzieś po drodze cząstki te otrzymały imię - gluony. Ale nazwać nie znaczy poznać.

Jeszcze jedna koncepcja przewijająca się przez prace teoretyków ma dla nas teraz znaczenie - Gell-Mann nadał jej nazwę - kolor. Nie ma on nic wspólnego z kolorem znanym nam z życia codziennego. Kolor pozwala wyjaśnić i przewidywać rezultaty eksperymentów. Wyjaśnia na przykład, w jaki sposób proton może mieć dwa kwarki u i jeden d , choć zakaz Pauliego wyraźnie mówi, że dwa identyczne obiekty nie mogą znajdować się w tym samym stanie. Jeśli jeden z kwarków u jest zielony, a drugi niebieski, to zakazowi Pauliego staje się zadość. Kolor jest dla oddziaływania silnego tym, czym znak ładunku dla elektryczności.

Kolor musi występować w trzech odmianach - orzekł Gell-Mann i inni pracujący w tym samym ogródku. Przypomnij sobie, drogi Czytelniku, że Faraday i Franklin ustalili, iż elektryczność występuje w dwóch rodzajach, oznaczonych plusem i minusem. Kwarki potrzebują trzech rodzajów. Tak więc teraz wszystkie kwarki występują w trzech kolorach. Być może pomysł kolorów został skradziony z palety malarskiej, ponieważ istnieją trzy podstawowe kolory. Lepiej można by to wyrazić za pomocą innej analogii: ładunek elektryczny jest jednowymiarowy - plus i minus wyznaczają tylko kierunek - a kolor jest trójwymiarowy (trzy osie: czerwona, niebieska i zielona). Kolor pozwolił wyjaśnić, dlaczego istnieją wyłącznie dwa rodzaje kombinacji kwarków: kwark z antykwarkiem (mezon) lub trzy kwarki (barion). Te kombinacje nie mają żadnej barwy. „Kwarkowość” znikła, gdy przyglądamy się mezonowi czy barionowi. Czerwony kwark łączy się z antyczerwonym, by powstał bezbarwny mezon. Czerwony i antyczerwony znoszą się nawzajem. Podobnie kwark czerwony, niebieski i zielony mieszają się w protonie i w efekcie powstaje biel. Znowu brak koloru.

Nawet jeśli istnieją sensowne powody, by używać określenia „kolor”, nie ma ono dosłownego znaczenia. Opisuje kolejną abstrakcyjną własność, którą teoretycy nadali kwarkom, by wyjaśnić narastającą liczbę danych. Równie dobrze mogliśmy je nazwać Tom, Dick i Harry albo A, B i C, ale kolor zdawał się być bardziej stosowną (barwną?) metaforą. Tak więc kolor wespół z kwarkami i gluonami już na zawsze stał się częścią czarnej skrzynki kryjącej abstrakcyjne byty, które nigdy nie spowodują trzasku w liczniku Geigera, nie zostawią śladu w komorze pęcherzykowej, nigdy nie potną drucika w elektronicznym detektorze.

Niemniej koncepcja głosząca, że oddziaływanie silne słabnie, gdy kwarki zbliżają się do siebie, była niezwykle ekscytująca z punktu widzenia dalszej unifikacji. Kiedy zmniejsza się odległość między cząstkami, zwiększa się ich względna energia. Ta asymptotyczna swoboda implikuje, że oddziaływanie silne słabnie przy wysokich ener-

giach. Poszukiwacze unifikacji mogli dzięki temu żywić nadzieję, że przy dostatecznie wysokiej energii siły oddziaływań silnego i elektroslabego są sobie bliskie.

A co z cząstkami przenoszącymi oddziaływanie? Jak mamy opisać nośnik oddziaływania i koloru? Okazało się, że gluony przenoszą dwa kolory - kolor i inny antykolor - oraz zmieniają kolor kwarka, który je pochłania lub emituje. Na przykład czerwony-antyniebieski gluon zmienia czerwony kwark w niebieski. Ta wymiana jest źródłem oddziaływania silnego. Murray Wielki-Nazwodawca nazwał tę teorię chromodynamiką kwantową (ang. *quantum chromodynamics*, QCD) na podobieństwo QED. Konieczność dokonywania zmian kolorów sprawia, że musimy mieć wystarczającą liczbę gluonów, by przeprowadzić wszystkie możliwe zmiany. Okazuje się, że wystarczy do tego osiem gluonów. Jeśli zapytasz, drogi Czytelniku, dlaczego osiem, teoretyk odpowie z mądrą miną: „No cóż, osiem to jest dziewięć odjąć jeden”.

Nasze zakłopotanie w obliczu tego, że nigdy nie widziano kwarka na zewnątrz hadronu, tylko umiarkowanie łagodzi możliwość wyobrażenia sobie, dlaczego kwarki są na stałe uwięzione. Gdy kwarki znajdują się blisko siebie, wywierają na siebie nawzajem stosunkowo niewielkie oddziaływanie. Jest to pole chwały teoretyków, którzy mogą obliczać własności stanu kwarka i jego wpływ na eksperymenty. Jednak, w miarę jak kwarki oddalają się od siebie, oddziaływanie staje się coraz silniejsze i energia potrzebna, by dalej zwiększać dzielącą je odległość, szybko rośnie, aż - na długo zanim faktycznie rozdzielimy kwarki - ilość włożonej energii jest wystarczająca, by powstała nowa para kwark-antkwark. Ta ciekawa własność wynika z tego, że gluony nie są zwykłymi, głupimi cząstkami przenoszącymi oddziaływanie. One faktycznie oddziałują ze sobą. Tu właśnie QCD różni się od QED, bo fotony ignorują się wzajemnie.

Niemniej QED i QCD łączy wiele podobieństw, szczególnie w obszarze wysokich energii. Choć nie od razu, to jednak nieodwołalnie QCD zaczęła odnosić sukcesy. Ponieważ nie pozwalała na opisanie długozasięgowej części siły, obliczenia nigdy nie były zbyt precyzyjne, a wiele eksperymentów podsumowywano raczej mglistym stwierdzeniem: „nasze wyniki są zgodne z przewidywaniami QCD”.

Cóż to zatem za teoria, skoro nigdy, przynajmniej nie możemy zobaczyć swobodnego kwarka? Potrafimy robić eksperymenty, w których wyczuwamy obecność elektronów, mierzyć je na rozmaite sposoby, nawet jeśli pozostają cały czas związane w atomie. Czy możemy tak samo postąpić z kwarkami oraz gluonami? Bjorken i Feynman sugerowali, że w bardzo twardych zderzeniach kwarki, które otrzymują wówczas doprawdy potężną dawkę energii, zostają gwałtownie wyrzucone i tuż przed uwolnieniem się spod wpływu swych kwarkowych partnerów maskują się, przybierając postać wąskiej wiązki hadronów: trzech, czterech czy nawet ośmiu pionów lub dodatkowo kilku kaonów i nukleonów. Miałyby to być bardzo wąskie wiązki, skierowane wzdłuż toru ruchu pierwotnego kwarka. Wiazki te nazwano „dżetami” i zaczęto ich szukać.

Trudno było zidentyfikować dżety za pomocą urządzeń z lat siedemdziesiątych, ponieważ wytwarzały one powolne kwarki, które dają początek szerokim dżetom z niewielką liczbą hadronów, a my potrzebowaliśmy dżetów wąskich i gęstych. Pierwszy sukces odniosła młoda eksperymentatorka, Gail Hanson, która otrzymała doktorat w MIT i pracowała w SLAC. Jej staranne analizy wykazały, że hadrony w produktach zderzeń elektronów oraz pozytonów o energii 3 GeV w akceleratorze SPEAR są ze sobą w pewien sposób skorelowane. Stwierdzenie tego stało się możliwe dlatego, że zderzały się czołowo elektrony i pozytony, a wylatywały - w przeciwnych kierunkach, by zachować pęd - kwarki oraz antykwarki. Te skorelowane dżety z trudem, ale nie-

dwuznacznie ujawniały się w analizie. Gdy siedzieliśmy z Demokrytem w pomieszczeniu kontrolnym CDF, co kilka minut na ekranach ukazywały się właśnie przypominające pęczek igieł wiązki, zawierające około dziesięciu hadronów - dwa dżety skierowane w przeciwnych kierunkach. Nie ma żadnego innego powodu, aby istniała taka struktura, jak tylko ten, że z kwarka o bardzo wysokiej energii i pędzie, który się przyodziewa, zanim wyjdzie na zewnątrz, powstaje strumień materii.

Jednak odkrycie o największym znaczeniu w tej dziedzinie zostało dokonane w Hamburgu za pomocą maszyny PETRA, zderzającej elektrony z pozytonami. Energia tych zderzeń wynosiła 30 GeV. Tu dżetowe struktury ujawniły się nawet bez analiz. Kwarki po prostu było widać w danych. Ale widać było coś jeszcze.

Jeden z detektorów współpracujących z PETRA ma swój własny akronim: TASSO (Two-Armed Solenoidal Spectrometer). Grupa pracująca z TASSO poszukiwała zderzeń, w których pojawiłyby się trzy dżety. Z QCD wynika, że pozyton i elektron anihilują, tworząc parę kwark i antykwark. Istnieje spore prawdopodobieństwo, że jeden z odlatujących kwarków wypromieniuje wirtualny gluon. W procesie tym mamy dość energii, by wirtualny gluon przeobraził się w rzeczywisty. Gluony są tak samo skromne jak kwarki i przyoblekają się przed wyjściem z czarnej skrzynki zderzenia. Stąd też możliwe jest zaobserwowanie trzech dżetów hadronów. Ale na to potrzeba więcej energii.

W roku 1978 cykle doświadczenia przy całkowitych energiach 13 i 17 GeV nie przyniosły oczekiwanych rezultatów, ale przy 27 GeV coś się stało. Analizę przeprowadziła kolejna kobieta-fizyk Sau Lan Wu, profesor na Uniwersytecie Stanu Wisconsin. Program Wu wkrótce wykrył ponad 40 przypadków, w których pojawiały się trzy dżety hadronów. Każdy z nich zawierał trzy do dziesięciu śladów (hadronów). Całość przypominała ornament zdobiący maskę mercedesa.

Fizycy pracujący w innych grupach na PETRA wkrótce zaobserwowali to samo zjawisko. Przeszukali zebrane dane i natrafili na trzydżetowe zdarzenia. Rok później odnotowano ich już tysiące. Tak oto udało się „zobaczyć” gluon. Charakterystyka śladów została opracowana przez teoretyka Johna Ellisa z CERN na gruncie QCD. Trzeba przyznać, że to jego interwencja sprawiła, iż wzrosła motywacja do prowadzenia badań. Latem roku 1979 podczas konferencji odbywającej się w Fermilabie obwieszczone, że wykryto gluony.

Mnie natomiast przypadł w udziale zaszczyt wystąpienia w programie Phila Donahue, by szerokimu ogółowi wyjaśnić istotę i znaczenie odkrycia. Niestety, więcej energii musiałem włożyć w przekonywanie widowni, że nie używamy bizonów żyjących na terenie Fermilabu w charakterze urządzeń do wczesnego ostrzegania o niebezpiecznym skażeniu radioaktywnym. Ale w fizyce prawdziwą nowiną były gluony. Bozony, a nie bizony.

Teraz wreszcie mieliśmy już wszystkie cząstki przenoszące oddziaływania, bardziej uczenie zwane bozonami cechowania. (Termin „bozon” pochodzi od hinduskiego fizyka, który opisał klasę cząstek o spinie równym liczbie całkowitej, natomiast „cechowanie” - od symetrii cechowania). Podczas gdy wszystkie cząstki materii mają spin równy 1/2 i nazywane są fermionami, spin cząstek przenoszących oddziaływania równa się 1 i cząstki te zwie się bozonami. (Przeskoczyliśmy po drodze pewne szczegóły).

Istnienie jednego z bozonów - fotonu - zostało przewidziane przez Einsteina w 1905 roku. Foton zaobserwował eksperymentalnie w roku 1923 Arthur Compton, używając promieni Roentgena rozpraszanych na elektronach związanych w atomach. Choć prąd neutralny odkryto już w połowie lat siedemdziesiątych, cząstek W i Z nie udało

się zarejestrować bezpośrednio aż do lat 1983-1984. (Odkryto je w CERN w akceleratorze hadronowym). Jak wspomniałem, gluony odkryto w 1979 roku.

W tych długich rozważaniach nad oddziaływaniem silnym powinniśmy zwrócić uwagę na to, że zostało ono określone jako oddziaływanie występujące między kwarkami i przenoszone przez gluony. A co się stało ze starym oddziaływaniem silnym między protonami i neutronami? Rozumiemy je teraz jako szczątkowe efekty działania gluonów, jak gdyby wyciekających z protonu i neutronu. Stare silne oddziaływanie, dość dobrze opisane jako wymiana pionów, jest obecnie interpretowane jako konsekwencja złożonych procesów zachodzących między kwarkami a gluonami.

Koniec drogi

U progu lat osiemdziesiątych naszego stulecia znaliśmy już wszystkie cząstki materii (kwarki i leptony), zidentyfikowaliśmy już także cząstki przenoszące trzy oddziaływania (bez grawitacji), czyli bozony cechowania. Dodając nośniki oddziaływania do cząstek materii, otrzymujemy kompletny model standardowy.

Oto „tajemnica Wszechświata”:

MATERIA

Pierwsza generacja	Druga generacja	Trzecia generacja
--------------------	-----------------	-------------------

KWARKI

u	c	t
d	s	b

LEPTONY

ν_e	ν_μ	ν_τ
e	μ	τ

ODDZIAŁYWANIA

BOZONY CECHOWANIA

elektromagnetyzm	foton (γ)
oddziaływanie słabe	W^+ , W^- , Z^0
oddziaływanie silne	osiem gluonów

Pamiętaj, drogi Czytelniku, że kwarki występują w trzech kolorach, jeśli więc ktoś chciałby być naprawdę uciążliwy, mógłby się doliczyć osiemnastu kwarków, sześciu leptonów i dwunastu bozonów cechowania. Jest jeszcze antytabela, w której wszystkie cząstki materii występują jako antymateria. To w sumie daje 60 cząstek, ale kto by to liczył. Trzymajmy się tej tabeli, ona zawiera wszystko, co trzeba wiedzieć. Wierzmy, że wreszcie mamy a-tomy Demokryta. Są nimi kwarki i leptony. Trzy rodzaje oddziaływań i przenoszące je cząstki pozwalają wyjaśnić demokrytejski „nieustanny, gwałtowny ruch”.

Na arogancję może zakrawać próba podsumowania całego Wszechświata w jednej tabeli, nawet jeśli ta tabela jest niezbyt porządna. Jednak wydaje się, że ludzie mają głęboką potrzebę konstruowania takich syntez. „Modele standardowe” wielokrotnie pojawiały się w historii zachodniej nauki. Nasz obecny model standardowy otrzymał tę nazwę dopiero w latach siedemdziesiątych i jest ona charakterystyczna dla nowszej historii fizyki, ale z pewnością w ciągu wieków pojawiały się także inne modele. Oto niektóre z nich:

MODEL STANDARDOWY**PRZYSPIESZONY KURS**

Twórcy	Daty	Cząstki	Siły	Oceny
--------	------	---------	------	-------

Uwagi

Tales (Milet)	600 p.n.e.	woda	brak	5-
---------------	------------	------	------	----

Jako pierwszy próbował wyjaśnić świat poprzez naturalne przyczyny, a nie działalność bogów. Zastąpił mitologię logiką.

Empedokles (Agrygent, Sycylia)	460 p.n.e.	ziemia, powietrze, woda i ogień	miłość i niezgoda	5+
--------------------------------	------------	---------------------------------	-------------------	----

Wprowadził koncepcję licznych cząstek, które składają się na rozmaite rodzaje materii.

Demokryt (Abdera)	430 p.n.e.	niewidoczny, niepodzielny <i>atomos</i> , czyli a-tom	nieustanny gwałtowny ruch	6
-------------------	------------	---	---------------------------	---

Jego model zakładał istnienie zbyt wielu rodzajów cząstek, każda o innym kształcie, ale jego podstawowa koncepcja niepodzielnego a-tomu do dziś pozostaje definicją cząstki elementarnej.

Issac Newton (Anglia)	1687	twarde, masywne, nieprzenikalne atomy	grawitacja (kosmos), nizeznane siły (atom)	4
-----------------------	------	---------------------------------------	--	---

Uznawał koncepcję atomów, ale nie przyczynił się do jej rozwoju. Grawitacja, której jest ojcem, stanowi w obecnej dekadzie główne źródło problemów.

Rudjer Bošković (Dalmacja)	1760	punkty oddziaływania, niepodzielne i pozbawione kształtu i wymiaru	siły przyciągania i odpychania między punktowymi atomami	5+
----------------------------	------	--	--	----

Jego teoria była niekompletna i ograniczona, ale koncepcja cząstek punktowych o zerowym promieniu, które wytwarzają pola sił, jest podstawowym pojęciem we współczesnej fizyce.

John Dalton (Anglia)	1808	atomy - podstawowe jednostki	przyciąganie między atomami	4+
----------------------	------	------------------------------	-----------------------------	----

pierwiastków chemicznych, jak tlen, węgiel itd.

Przedwcześnie wskrzesił demokretyjski termin *atomos*. Jego atom nie był niepodzielny, ale Dalton dostarczył istotnej wskazówki, mówiąc, że atomy różnią się między sobą masą, a nie kształtem, jak sądził Demokryt.

Michael Faraday (Anglia) 1820 ładunki elektryczne elektromagnetyzm 5
(plus grawitacja)

Zastosował teorię atomistyczną do elektryczności, przyjmując, że prąd składa się z cząstek elektryczności - elektronów.

Dymitr Mendelejew (Rosja) 1870 ponad 50 atomów uporządkowanych wedle wzrastającej masy nie zajmował się siłami 5

Rozwinął koncepcję Daltona, uporządkował wszystkie znane pierwiastki chemiczne. Tabela, którą stworzył, wskazywała na głębszą strukturę atomu.

Ernest Rutherford (Nowa Zelandia) 1911 dwie cząstki: jądro i elektron silne oddziaływanie jądrowe plus elektromagnetyzm i grawitacja 6-

Odkrywając jądro ujawnił nowy, prostszy porządek panujący wewnątrz wszystkich atomów Daltona.

Bjorken, Fermi, Friedman, Gell-Mann, Glashow, Kennedy, Lederman, Perl, Richter, Schwartz, Steinberg, Taylor, Ting i tysiące innych 1992 6 kwarków, 6 leptonów i ich antycząstki (kwarki występują w trzech kolorach) elektromagnetyzm, oddziaływanie silne, oddziaływanie słabe, dwanaście nośników oddziaływania oraz grawitacja nie kompletny

$X\alpha$, $X\alpha$, $X\alpha$ (śmiech) - Demokryt z Abdery.

Dlaczego nasz model standardowy jest tak niekompletny? Jedną z oczywistych jego wad polega na tym, że nie znaleziono jeszcze kwarka t^1 . Kolejną, to brak jednej z

¹ Kwark t został odkryty 26 kwietnia 1996 roku. (przyp. red.).

sił: grawitacji. Nikt nie wie, jak włączyć do schematu tę wspaniałą staruszkę. Z estetycznego punktu widzenia przeszkadza nam to, że model standardowy jest zbyt skomplikowany; powinien bardziej przypominać model Empedoklesa: ziemia, powietrze, woda i ogień plus miłość i niezgoda. Model standardowy zawiera zbyt wiele parametrów.

Co oczywiście nie znaczy, że model standardowy nie jest jednym z najwspanialszych osiągnięć nauki. Stanowi owoc wysiłków wielu osób (obojga płci), które pracowały po nocach i nie dosypiały. Ale podziwiając piękno i możliwości nie sposób oprzeć się pragnieniu znalezienia czegoś prostszego, modelu, który mógłby spodobać się nawet starożytnemu Grekowi.

Posłuchaj: słyszysz śmiech dochodzący z pustki?

12. I wreszcie Boska Cząstka

I Pani spojrzała na świat, i zadumała się nad jego pięknem. I zapłakała, widząc tyle piękna. Był to świat jednego rodzaju cząstek, jednego oddziaływania, przenoszonego przez jeden nośnik, będącego - w boskiej prostocie - tą samą cząstką.

I Pani spojrzała na świat, który stworzyła, i zobaczyła, że był nudny. Przeliczyła w pamięci, uśmiechnęła się i sprawiła, że Wszechświat się rozszerzył i ochłodził. I oto stał się dostatecznie chłodny, by zaczął działać jej wierny i wypróbowany sługa, który przedtem nie mógł znieść niewiarygodnego gorąca stwarzania: pola Higgsa. I pod wpływem Higgsa cząstki wysysały energię z pola, absorbowały ją i stawały się masywne. Każda z nich rosła w sobie właściwy sposób. Niektóre cząstki stały się niewiarygodnie masywne, inne tylko trochę, a jeszcze inne nie zmieniły się wcale. I tam, gdzie przedtem był tylko jeden rodzaj cząstek, teraz pojawiło się ich dwanaście. I tam, gdzie przedtem nośnik i cząstka były tożsame, teraz się różnili. I tam, gdzie przedtem był jeden nośnik i jedno oddziaływanie, teraz było dwanaście nośników i cztery oddziaływania. I tam, gdzie przedtem było bezgraniczne i pozbawione sensu piękno, teraz byli demokraci i republikanie.

I Pani spojrzała na świat, który stworzyła, i wybuchnęła niepohamowanym śmiechem. Wezwała Higgsa i tłumiąc wesołość, rozprawiła się z nim surowo, i rzekła:

„Dlaczego zniszczyłeś symetrię świata?”

A Higgs, zdruzgotany cieniem nagany, tak się bronił:

„Nie zniszczyłem symetrii, Szefowo. Sprawilem tylko, że została ukryta, wpadła w pułapkę nadmiernej konsumpcji energii. I tym sposobem rzeczywiście sprawilem, że świat stał się skomplikowany.

Któż mógł przypuszczać, że z tego ponurego zbiorowiska identycznych obiektów mogą powstać jądra, atomy i cząsteczki, planety i gwiazdy?

Któż mógł przewidzieć zachody Słońca i oceany, i szlam organiczny, zrodzony z wszystkich tych okropnych cząsteczek wzbudzonych przez błyskawice i ciepło. Któż mógł się spodziewać ewolucji i tych fizyków, którzy szperają, węszą wokół i próbują odkryć to, co tak starannie ukryłem?”

I Pani, nie mogąc powstrzymać się od śmiechu, skinęła na Higgsa, dając mu znak przebaczenia i przyzwoitą podwyżkę.

Zupełnie Nowy Testament 3, 1-12

W części tej zajmiemy się przekładem poezji (?) *Zupełnie Nowego Testamentu* na rzetelną naukę o genezie cząstek. Nie możemy jednak jeszcze porzucać rozważań nad modelem standardowym. Jest kilka wątków wymagających podsumowania i kilka innych, z którymi jeszcze nie potrafimy sobie poradzić. Oba zestawy odgrywają ważną rolę w historii modelu-standardowego-i-kolejnych. Muszę też omówić kilka epokowych eksperymentów, które dały solidne podstawy naszemu obecnemu obrazowi mikroświata. Szczegóły te pozwolą nam zorientować się w mocnych stronach i ograniczeniach modelu standardowego.

Model standardowy ma dwa rodzaje kłopotliwych usterek. Pierwszy wiąże się z jego niekompletnością. Według danych na początek roku 1993 wciąż jeszcze nie odkryto kwarka t^1 . Jedno z neutrino (taonowe) nie zostało jeszcze bezpośrednio zarejestrowane, a niektóre potrzebne wielkości liczbowe znane są tylko w przybliżeniu. Nie wiemy na przykład, czy neutrino są obdarzone masą spoczynkową. Powinniśmy dowiedzieć się, skąd się bierze łamanie symetrii kombinowanej (CP) - mechanizm odpowiedzialny za powstanie materii - i, co najważniejsze, by ocalić matematyczną spójność modelu standardowego, musimy wprowadzić nowy obiekt, zwany polem Higgsa. Drugi rodzaj usterek ma naturę czysto estetyczną. Model standardowy jest tak skomplikowany, że wielu uważa go tylko za etap pośredni na drodze do prostszego obrazu świata. Pole Higgsa i jego przyboczna cząstka - bozon Higgsa - odgrywa istotną rolę we wszystkich wymienionych wyżej zagadnieniach. Do tego stopnia istotną, że o tej właśnie cząstce mówimy w tytule „Boska Cząstka”.

Wyjątki z agonii modelu standardowego

Weźmy pod uwagę neutrino.

- Które neutrino?

Dowolne, powiedzmy neutrino elektronowe - zwykłą, pospolitą odmianę neutrino - jako że ma najmniejszą masę. (Chyba że masy wszystkich neutrino są zerowe).

W porządku, niech będzie neutrino elektronowe.

Nie ma ładunku elektrycznego.

Nie podlega oddziaływaniom silnym ani elektromagnetycznym.

Nie ma rozmiaru, rozciągłości przestrzennej. Jego promień jest równy zeru.

Możliwe, że nie ma masy.

Nic nie jest tak pozbawione własności (wyjąwszy dziekanów i polityków) jak neutrino. Jego egzystencja jest mniej niż ulotna.

W dzieciństwie niektórzy z nas recytowali wierszyk:

Mała mucho na ścianie,
Nie masz wcale rodziny?
Ani matki?
Ani ojca?
Szkoda cię, biedny bękarcie.

A teraz ja:

Małe neutrino na świecie,
Z prędkością światła lecisz.
Bez ładunku, bez masy, bez żadnych wymiarów?
Wstyd! Nie stosujesz się do konwenansów.

A jednak neutrino istnieje. Ma coś w rodzaju położenia - trajektorię - zawsze zmierza w jednym kierunku z prędkością bliską (lub równą) prędkości światła. Neutrino ma

¹ Kwark t został odkryty 26 kwietnia 1996 roku. (przyp. red.).

spin, ale jeśli spytasz, drogi Czytelniku, co takiego tam wiruje, zdemaskujesz się jako ktoś, kto nie wyzbył się jeszcze niedoskonałych nawyków przedkwantowego sposobu myślenia. Spin jest nieodłącznie związany z pojęciem cząstki i jeśli neutrino ma rzeczywiście zerową masę, to jego spin w połączeniu ze stałą, niezmienną prędkością poruszania się - równą prędkości światła - składa się na nowy atrybut, zwany skrętnością lub chiralnością (ang. *chirality*). To nieodwracalnie wiąże kierunek spinu (zgodny lub przeciwny do ruchu wskazówek zegara) z kierunkiem ruchu.

Neutrino może więc być „prawoskrętne” - co oznacza, że przemieszcza się ze spinem zgodnym z ruchem wskazówek zegara - lub „levoskrętne”, gdy wędruje ze spinem skierowanym przeciwnie do ruchu wskazówek zegara. Mamy tu do czynienia z uroczą symetrią. Teoria preferuje sytuację, w której wszystkie cząstki mają zerową masę i uniwersalną symetrię chiralną. No i znowu to słowo: symetria.

Symetria chiralna jest jedną z tych eleganckich symetrii, które opisują młody Wszechświat; przypomina wzór tapety powtarzający się niezmiennie i bez końca, nie przerywany korytarzami, drzwiami czy załamaniem - jest nieskończona. Nic dziwnego, że Pani uznała ją za nudną i nakazała polu Higgsa, by nadało cząstkom masę i złamało tę symetrię. Ale dlaczego pojawienie się masy zaburza symetrię? Cząstka obdarzona masą porusza się z prędkością mniejszą od prędkości światła. Teraz obserwator może poruszać się szybciej niż cząstka. W takim wypadku, względem tego obserwatora, cząstka zmienia kierunek ruchu, ale nie swój spin. A zatem obiekt dla niektórych obserwatorów levoskrętny, dla innych staje się obiektem prawoskrętnym. Są jeszcze neutrina, które, być może, stanowią pozostałość z wojny o symetrię chiralną. Neutrino jest zawsze levoskrętne, antyneutrino - zawsze prawoskrętne. Skrętność to jedna z nielicznych własności, jaką ten mały biedak ma.

Ach tak, neutrina mają jeszcze jedną własność: podlegają oddziaływaniom słabym. Neutrina powstają na skutek słabych procesów, które przebiegają bardzo powoli (czasem zajmują całe mikrosekundy). Jak widzieliśmy, mogą zderzać się z innymi cząstkami, ale wymaga to tak bliskiego kontaktu, tak głębokiej intymności, że do zdarzeń tych dochodzi niezmiernie rzadko. Twarde zderzenie neutrina w kilkucentymetrowej stalowej sztabce jest równie prawdopodobne, jak to, że zaczerpnąwszy do kubka wodę z oceanu, znajdziemy w nim mały kamyk wrzucony w odmęty: innymi słowy, że uda się go wyłowić, zanurzając kubek jeden raz w dowolnym miejscu. Jednak, mimo całego tego braku własności, neutrino wywiera kolosalny wpływ na bieg wydarzeń. To przecież właśnie natłok ogromnej liczby neutrin zgromadzonych w jądrze gwiazdy powoduje jej eksplozję i rozpraszanie się w przestrzeni kosmicznej cięższych pierwiastków, powstałych w skazanej na zagładę gwiazdzie. Odłamki z takiej eksplozji mogą się łączyć i dlatego mamy krzem, żelazo i inne pożyteczne rzeczy, które można znaleźć na planetach Układu Słonecznego.

Ostatnio podjęto wyęteżone wysiłki, by określić masę neutrina, jeśli w ogóle jakąkolwiek ma. Trzy neutrina należące do naszego modelu standardowego są kandydatami na to, co astronomowie nazywają „ciemną materią”. Jest to materia, która według nich wypełnia Wszechświat i decyduje o przebiegu jego ewolucji, zdeterminowanej przez grawitację. Na razie wiemy tylko, że neutrina mogą mieć bardzo niewielką masę... albo zerową. Zero jest tak bardzo specyficzną liczbą, że gdyby neutrino miało choćby najmniejszą masę, powiedzmy miliardową część masy elektronu, wynikałyby stąd poważne konsekwencje teoretyczne. Zagadnienia związane z neutrinami i ich masą są tylko niektórymi z licznych otwartych kwestii dotyczących modelu standardowego.

Ukryta prostota: upojenie modelem standardowym

Kiedy uczony, powiedzmy Brytyjczyk, jest naprawdę, ale to naprawdę rozgniewany na kogoś, kiedy został doprowadzony do ostateczności i wyzwiska same cisną mu się na usta, mruczy wtedy pod nosem: „Cholerny arystotelik”. Trudno sobie wyobrazić cięższą obelgę. Powszechnie uważa się (być może, niesłusznie), że Arystoteles wstrzymał rozwój fizyki na mniej więcej dwa tysiące lat - do dnia, kiedy Galileusz wykazał dość odwagi i determinacji, by rzucić mu wyzwanie. Na oczach tłumu zgromadzonego na Piazza del Duomo zawstydził wyznawców doktryny Arystotelesa. Dziś w tym miejscu krzywi się wieża, a cały plac otoczony jest wianuszkami lodziarni i sklepów z pamiątkami.

Mamy już za sobą przegląd historii badań obiektów spadających z przekrzywionych wież: pióro splywa w dół, stalowa kulka spada szybko. Arystotelesowi wydawało się to zupełnie oczywiste, więc powiedział: „Ciała ciężkie spadają szybko, lekkie zaś - powoli”. Jest to w pełni zgodne z intuicją. Jeśli pchniesz kulę, ta zawsze w końcu się zatrzyma. Dlatego Arystoteles orzekł: spoczynek jest „naturalnym stanem, podczas gdy ruch wymaga siły sprawczej, która by go podtrzymywała”. To absolutnie jasne zdanie potwierdza nasze codzienne doświadczenie. A jednak... jest ono (zdanie) fałszywe. Galileusz żywił pogardę nie dla Arystotelesa, lecz dla pokoleń filozofów, którzy kroczyli jego śladem i przyjmowali jego poglądy bez najmniejszych zastrzeżeń.

Galileusz dostrzegł głęboką prostotę praw rządzących ruchem, skrytą za zasłoną takich czynników, jak opór powietrza i tarcie, które są nieodłączną częścią rzeczywistego świata. Dostrzegł, że świat tak naprawdę powinien dać się opisać językiem matematyki: za pomocą parabol, równań kwadratowych i tym podobnych. Neil Armstrong, pierwszy człowiek, który stanął na Księżycu, upuścił piórko i młotek na pozbawioną atmosfery powierzchni naszego satelity. Powtórzył tym samym, na oczach całej ludzkości, eksperyment z wieży. Dwa ciała spadały z jednakową prędkością, nie napotkawszy żadnego oporu. A kula tocząca się po poziomej powierzchni poruszałaby się bez końca, gdyby nie było tarcia. Kula toczy się znacznie dłużej na wypolerowanym stole, a jeszcze dłużej na poduszczce powietrznej lub na śliskim lodzie. Aby wyobrazić sobie ruch bez zakłócającego wpływu powietrza, bez tarcia tocznego, trzeba umieć myśleć abstrakcyjnie; zyskuje się wówczas nagrodę w postaci wglądu w istotę praw rządzących ruchem, przestrzenią i czasem.

Od czasu, kiedy rozegrała się ta krzepiąca ducha historia, wiele dowiedzieliśmy się o ukrytej prostocie. Ukrywanie symetrii, prostoty i piękna, które można opisać abstrakcyjnym językiem matematyki, jest typowym zachowaniem przyrody. Zamiast galileuszowego oporu powietrza i tarcia (oraz towarzyszących im trudności politycznych), mamy dziś przed sobą model standardowy. Chcąc prześledzić rozwój tej koncepcji aż do lat dziewięćdziesiątych naszego stulecia, musimy kontynuować opowieść o ciężkich cząstkach, które przenoszą oddziaływanie słabe.

Model standardowy A. D. 1980

W lata osiemdziesiąte wkroczyliśmy z dużą dozą teoretycznego samozadowolenia. Oto wreszcie mieliśmy model standardowy - owoc 300 lat badań fizyki cząstek - a doświadczalnicy stanęli przed zadaniem „wypełnienia pustych rubryk”. Nie zaobserwowano jeszcze cząstek W^+ , W^- i Z^0 oraz kwarka t . Należałoby jeszcze wykryć neutrino taonowe, ale by to zrobić, trzeba przeprowadzić tryneutrinowy eksperyment. Składano nawet rozmaite propozycje takich doświadczeń, ale były bardzo skomplikowane i nie dawały wielkich szans na sukces. Żadna z propozycji nie została zaaprobowana. Niemniej eksperymenty z udziałem naładowanego taonu wyraźnie wskazują, że musi istnieć neutrino taonowe.

Wszystkie maszyny - akceleratory pozytonów i elektronów oraz protonów - pracują pełną parą, poszukując kwarka t . W Japonii budowany jest nowy akcelerator - Tristan (jakaż to głęboka więź łączy japońską kulturę z celtycką mitologią?). Jest to akcelerator elektronów i pozytonów, który może wyprodukować mezon, będący zlepkiem kwarka t i antykwarka t , pod warunkiem, że masa t jest mniejsza niż 35 GeV, czyli co najwyżej siedem razy większa od kuzyna o innym zapachu, kwarka b . Losy eksperymentu i oczekiwania wobec Tristana - jeśli idzie o kwark t - są przesądzone. t jest za ciężki.

Chimera unifikacji

Europejczycy zaangażowali wszystkie siły i środki w poszukiwania cząstki W . Chcieli pokazać światu, że w tej dziedzinie są liczącym się partnerem. Aby znaleźć W , trzeba było dysponować maszyną o dostatecznie dużej energii - takiej, by poszukiwana cząstka miała szansę w ogóle powstać. Jakiej? To zależy od ciężaru cząstki. W roku 1978, w odpowiedzi na nieustępliwą i gwałtowną argumentację Carla Rubbii, CERN przystąpił do budowy akceleratora protonów i antyprotonów. Nowe urządzenie miało korzystać z istniejącego już akceleratora protonów o mocy 400 GeV.

Pod koniec lat siedemdziesiątych teoretycy uważali, że masa cząstek W i Z jest „sto razy większa od protonu”. (Przypomnijmy, że masa spoczynkowa protonu wynosi około 1 GeV). Ocenę mas cząstek W i Z przyjęto z tak wielkim zaufaniem, że CERN nie zawahał się zainwestować ponad 100 milionów dolarów w „pewniaka” - akcelerator mogący wyprodukować taką ilość energii, by powstały w nim cząstki W i Z , i w zestaw odpowiednio czułych i kosztownych detektorów dla obserwowania zderzeń. Skąd się brało to zuchwałe przekonanie?

W środowisku fizyków zapanowało radosne przeświadczenie, że wielka zunifikowana teoria - ostateczny cel naszych zmaganiań - jest tuż za zakrętem. To już nie miał być model opisujący świat za pomocą sześciu kwarków, sześciu leptonów i czterech sił, ale jedno wielkie - och, jakże wielkie! - zunifikowane oddziaływanie. Z pewnością mogłoby ono stanowić spełnienie starożytnej idei, przyświecającej nam przez cały czas wędrówki od wody przez powietrze i ziemię do ognia, a wreszcie do całej czwórki.

Unifikacja, poszukiwanie prostej i wszechobejmującej teorii jest świętym Graalem fizyki. Einstein już w 1901 roku (w wieku 22 lat) pisał o związkach między oddziaływaniem molekularnym (elektrycznym) a grawitacyjnym. Od roku 1925 aż do śmierci w 1955 roku na próżno poszukiwał jednolitej teorii oddziaływania elektromagnetycznego i grawitacji. Ten ogromny wysiłek jednego z największych fizyków tamtej epoki, a właściwie wszech czasów, nie przyniósł spodziewanych efektów. Wiemy teraz o istnieniu

dwóch pozostałych rodzajów oddziaływania: słabego i silnego. Bez ich uwzględnienia wysiłki Einsteina były skazane na porażkę. Innym istotnym powodem jego porażki było to, że zanegował centralne osiągnięcie fizyki XX wieku (do którego powstania sam walczył się przyczynił) - teorię kwantową. Do końca nie zaakceptował tej radykalnej i rewolucyjnej koncepcji, która stanowi punkt wyjścia do unifikacji wszystkich oddziaływań. Już pod koniec lat sześćdziesiątych trzy z czterech oddziaływań zostały opisane w języku kwantowej teorii pola i wprost wołały o unifikację.

Wszyscy wielcy teoretycy nad nią pracowali. Pamiętam seminarium na Uniwersytecie Columbia na początku lat pięćdziesiątych, podczas którego Heisenberg i Pauli przedstawiali swoją nową zunifikowaną teorię cząstek elementarnych. Sala (nr 301 w Puppin Hall) była zatłoczona do granic możliwości. W pierwszym rzędzie siedzieli: Niels Bohr, I. I. Rabi, Charles Townes, T. D. Lee, Polycarp Kusch, William Lamb i James Rainwater - sami ówczesni i przyszli laureaci Nagrody Nobla. Asystenci, jeśli mieli dość siły przebicia, by w ogóle otrzymać zaproszenie, tłoczyli się w sali wbrew wszelkim przepisom przeciwpożarowym. Studenci zwisali pod stropem, podwieszani hakami do belek. Było naprawdę tłoczno. Teoria mnie zupełnie przerastała, ale choć jej nie rozumiałem, wcale nie musiało to oznaczać, że jest prawdziwa. Pod koniec Pauli przyznał: „Tak, to jest szalona teoria”. Odpowiedź Bohra brzmiała mniej więcej tak: „Problem tkwi w tym, że nie jest dostatecznie szalona”. Bohr znowu miał słuszość, jako że teoria ta odeszła w niepamięć jak wiele innych śmiałych prób.

Wewnętrznie spójna teoria oddziaływania musi być kwantową teorią pola łączącą w sobie szczególną teorię względności i symetrię cechowania. Ta ostatnia własność - i, o ile wiemy, tylko ona - gwarantuje, że teoria taka będzie matematycznie spójna i da się znormalizować. Ale to jeszcze nie wszystko. Idea symetrii cechowania ma istotny aspekt estetyczny, który - co ciekawe - pochodzi od tej jedynej siły, która nie została jeszcze sformułowana jako kwantowa teoria pola: od grawitacji. Teoria grawitacji Einsteina (w odróżnieniu od sformułowanej przez Newtona) wyrosła z pragnienia znalezienia takiego ujęcia praw przyrody, aby były identyczne dla wszystkich obserwatorów: zarówno znajdujących się w stanie spoczynku, jak i poruszających się z pewnym przyspieszeniem w polu grawitacyjnym, na przykład na powierzchni Ziemi, która obraca się z prędkością 1600 km/h. W takim wirującym laboratorium pojawiają się siły, które sprawiają, że wyniki eksperymentu są inne, niż gdyby został on przeprowadzony w laboratorium poruszającym się ruchem jednostajnym, czyli bez przyspieszenia. Einstein poszukiwał praw, które wyglądałyby jednakowo dla wszystkich obserwatorów. Z tego wymagania niezmienniczości, które narzucił przyrodzie w roku 1915 w ogólnej teorii względności, logicznie wynikało istnienie oddziaływania grawitacyjnego. Mówię to wszystko tak szybko, ale ciężko się napracowałem, żeby to zrozumieć! W teorię względności jest wbudowana symetria, która implikuje istnienie oddziaływania - w danym wypadku oddziaływania grawitacyjnego.

Podobnie symetria cechowania, zakładająca bardziej abstrakcyjny warunek niezmienniczości nałożony na odpowiednie równania, daje oddziaływania: słabe, silne oraz elektromagnetyczne.

Cechowanie

Znajdujemy się na początku prywatnej uliczki, która wiedzie do rezydencji Boskiej Cząstki. Musimy odświeżyć sobie kilka pojęć. Jedno z nich dotyczy cząstek materii - kwarków i leptonów. Spin każdej z nich, wyrażony w kwantowych jednostkach, wynosi $1/2$. Mamy także pola sił, które można również przedstawić w postaci cząstek: kwantów pola. Te cząstki mają spin całkowity - równy jedności. Chodzi tu ni mniej, ni więcej tylko właśnie o cząstki: nośniki oddziaływań, bozony pośrednie, o których już sporo mówiliśmy. Należą do nich fotony, cząstki W , Z i gluony. Wszystkie zostały już odkryte, a ich masa jest znana. By uporządkować cały ten wachlarz cząstek materii i nośników oddziaływania, rozważmy ponownie pojęcia niezmienniczości i symetrii.

Od dłuższego czasu krążymy wokół pojęcia symetrii cechowania, gdyż bardzo trudno jest je wyjaśnić, a może nawet w ogóle nie jest to możliwe. Problem częściowo tkwi w tym, drogi Czytelniku, że książkę tę czytasz po polsku, a symetria została opisana językiem matematyki. Kiedy posługujemy się naszym językiem, musimy uciekać się do pomocy metafor. Pokrążmy zatem jeszcze trochę, a może na coś się to przyda.

Na przykład kula jest doskonale symetryczna w tym sensie, że możemy ją obrócić o dowolny kąt wokół dowolnie wybranej osi i nie spowodujemy tym żadnej zmiany układu. Czynność obracania można opisać matematycznie. Równanie, które opisuje kulę po obrocie, jest pod każdym względem identyczne z równaniem sprzed obrotu. Symetria kuli prowadzi więc do niezmienniczości równania opisującego kulę względem przekształcenia - obrotu.

Ale kogo obchodzą kule? Pusta przestrzeń, tak samo jak kula, jest niezmiennicza względem obrotu. Dlatego też i równania fizyczne muszą mieć tę samą cechę. W języku matematyki oznacza to, że jeśli obrócimy układ współrzędnych xyz o dowolny kąt wokół dowolnej osi, kąt ten w ogóle nie pojawi się w równaniu. Omawialiśmy już inne rodzaje podobnych symetrii. Na przykład ciało leżące na nieskończonej płaszczyźnie można przesunąć o dowolną odległość w dowolnym kierunku i układ znowu jest identyczny (niezmienniczy) z układem sprzed przesunięcia. Ten ruch, przesunięcie z punktu A do punktu B , nazywamy translacją. Uważamy, że przestrzeń jest niezmiennicza względem translacji. Oznacza to, że jeśli do wszystkich pomiarów odległości dodamy 12 metrów, to ta wielkość skróci się we wszystkich obliczeniach i w ogóle się w nich nie pojawi. Dlatego też - kontynuując wyliczankę - prawa fizyki muszą być niezmiennicze względem translacji. Na zakończenie tej dygresji na temat symetrii i zasad zachowania trzeba wspomnieć o prawie zachowania energii. Co ciekawe, symetria, z którą jest ono związane, dotyczy czasu, czyli tego, że prawa fizyki są niezmiennicze względem translacji w czasie. Innymi słowy, jeśli w jakimś równaniu opisującym prawo fizyki dodamy jakiś odcinek czasu, powiedzmy 15 sekund, wszędzie tam, gdzie czas się pojawia, dodatek ten się zniweluje i równanie pozostanie niezmiennicze względem tego przesunięcia.

A teraz niespodzianka. Symetria odsłania nowe cechy przestrzeni. Wspominałem już wcześniej o Emmy Noether. W roku 1918 ustaliła ona, że każdej symetrii (przejawiającej się w tym, że podstawowe równania nie dostrzegają na przykład obrotu albo przesunięcia w przestrzeni lub w czasie) odpowiada jakieś prawo zachowania! A prawa takie można sprawdzać eksperymentalnie. Noether doprowadziła w swych pracach do wykrycia związku łączącego niezmienniczość względem przesunięcia z dobrze znanym prawem zachowania pędu, niezmienniczość względem obrotu z prawem zachowania

momentu pędu, a niezmienniczość względem przesunięcia w czasie z prawem zachowania energii. A zatem (odwracając to rozumowanie) te niepodważalne zasady zachowania mówią nam coś o symetriach respektowanych przez czas i przestrzeń.

Zasada zachowania parzystości, o której mówiłem w interludium C, jest przykładem dyskretnej symetrii, która dotyczy mikroskopowego, kwantowego królestwa. Lustrzana symetria dosłownie sprowadza się do odbicia lustrzanego wszystkich współrzędnych układu fizycznego. Matematycznie zaś sprowadza się to do zmiany wartości współrzędnej z na $-z$, gdy oś z jest prostopadła do zwierciadła. Jak widzieliśmy, choć oddziaływanie silne i elektromagnetyczne respektują tę symetrię, to słabe tego nie robi, co oczywiście sprawiło nam niewysłowioną radość dawno temu, w 1957 roku.

Jak dotąd większość tego, o czym tu mówimy, to tylko powtórka i widzę, że studenci radzą sobie zupełnie nieźle. (Czuję to). W rozdziale siódmym przekonaliśmy się, że mogą istnieć także inne, bardziej abstrakcyjne rodzaje symetrii, nie związane z geometrią, do której odwoływały się dotychczasowe przykłady. Nasza najlepsza kwantowa teoria pola - elektrodynamika kwantowa (QED) - okazuje się niezmiennicza ze względu na coś, co wygląda jak dramatyczna zmiana w opisie matematycznym: nie względem obrotu, przesunięcia czy odbicia geometrycznego, ale względem znacznie bardziej abstrakcyjnej zmiany w opisie pola. Zmianę tę nazywamy przekształceniem cechowania. Nie będziemy zgłębiać tego pojęcia, bo skomplikowany matematyczny aparat pojęciowy, niezbędny do dalszego opisu, mógłby u niektórych wywołać nadmierny niepokój. Niech nam zatem wystarczy stwierdzenie, że równania QED są niezmiennicze względem transformacji cechowania. Jest to bardzo potężny rodzaj symetrii w tym sensie, że z niej samej można wyprowadzić wszystkie własności oddziaływania elektromagnetycznego. Wprawdzie inaczej się to odbywało w ciągu dziejów, ale obecnie niektóre zaawansowane podręczniki w ten właśnie sposób to przedstawiają. Symetria ta sprawia, że nośnik oddziaływania - foton - nie ma masy. Ponieważ brak masy łączy się z symetrią cechowania, foton bywa nazywany bozonem cechowania. (Pamiętaj, drogi Czytelniku, że termin „bozon” oznacza cząstkę, zazwyczaj przenoszącą oddziaływanie, która ma spin równy 1). A ponieważ wykazano, że QED, oddziaływanie silne i słabe są opisane równaniami wykazującymi symetrię cechowania, wszystkie nośniki oddziaływań - fotony, cząstki W , Z i gluony - są nazywane bozonami cechowania.

Przez trzydzieści lat Einstein bezowocnie poszukiwał zunifikowanej teorii wszystkich oddziaływań. Pewien sukces odnieśli dopiero Glashow, Weinberg i Salam pod koniec lat sześćdziesiątych. Stworzyli oni spójną, zunifikowaną teorię oddziaływań słabego i elektromagnetycznego. Wynikało z niej, że musi istnieć rodzina cząstek przenoszących oddziaływanie: foton, W^+ , W^- oraz Z^0 .

Teraz wreszcie pojawia się motyw wprowadzający Boską Cząstkę. Skąd się wzięły w tej teorii ciężkie cząstki W i Z ? W jaki sposób tak różne obiekty, jak pozbawiony masy foton i masywne cząstki W i Z , mogą być członkami tej samej rodziny? Ogromne różnice mas nośników pozwalają wyjaśnić różnice w zachowaniu oddziaływań elektromagnetycznego i słabego.

Później wrócimy jeszcze do tego stopniowanego wprowadzenia naszej bohaterki. Zbyt wiele teorii wyraźnie mi nie służy. A zresztą, zanim teoretycy znajdą odpowiedź na to pytanie, my musimy wytropić W .

Wytropić W

No więc CERN wyłożył gotówkę (czy raczej wręczył ją Carlowi Rubbii) i poszukiwania cząstki W nabrały rozpędu. Przypominam, że jeśli masa W wynosi około 100 GeV, to w zderzeniu musi uczestniczyć znacznie większa ilość energii. Proton o energii 400 GeV zderzający się z protonem w stanie spoczynku nic nie wskóra, bo na tworzenie nowych cząstek zostaje tylko 27 GeV. Reszta energii idzie na zachowanie pędu. Dlatego właśnie Rubbia zaproponował zderzenie dwóch wiązek. Jego idea polegała na tym, żeby jako źródła antyprotonów użyć iniektora do akceleratora SPS (w CERN) o energii 400 GeV. Po zgromadzeniu odpowiedniej liczby antycząstek chciał je wpuszczać do pierścienia SPS z grubsza tak, jak to opisałem w części szóstej (Akceleratory: one rozkwaszają atomy, nieprawdaż?).

W odróżnieniu od późniejszego teatronu, SPS nie był akceleratorem nadprzewodzącym i jego maksymalna energia była ograniczona. Gdyby obie wiązki rozpędzić do maksymalnej możliwej w SPS energii - 400 GeV - to można by otrzymać kolosalną energię zderzenia: 800 GeV. Jednak zdecydowano się na 270 GeV w każdej wiązce.

Dlaczego nie 400 GeV? Przede wszystkim dlatego, że przez bardzo długie okresy - przez wiele godzin podczas trwania zderzeń - w magnesach musiałby płynąć prąd o niezwykle wysokim natężeniu. Magnesy te nie były do tego przystosowane; tak duży prąd spowodowałby ich przegrzanie. Po drugie, podtrzymywanie wysokiego natężenia pola magnetycznego przez dłuższy czas jest niezwykle kosztowne. Magnesy w SPS zostały tak zaprojektowane, aby można było w krótkim czasie podwyższyć natężenie pola magnetycznego do maksymalnej wartości, przez kilka sekund je utrzymać, dostarczając wiązki protonów klientom, którzy robili doświadczenia ze stacjonarnymi tarczami, a potem szybko zmniejszyć natężenie pola do zera. Plan Rubbii, żeby zderzać ze sobą dwie wiązki, był bardzo pomysłowy, lecz problem tkwił w tym, że urządzenie, którym dysponował, nie zostało zaprojektowane z myślą o tego rodzaju eksperymencie.

Władze CERN zgodziły się z Rubbią, że 270 GeV energii w każdej wiązce - to znaczy całkowita energia równa 540 GeV - powinno wystarczyć na wyprodukowanie cząstek W , które ważą tylko około 100 GeV. Projekt zyskał aprobatę i w 1978 roku wyasygnowano odpowiednią kwotę we frankach szwajcarskich. Rubbia skompletował dwa zespoły. Pierwszy z nich skupiał geniuszy od akceleratorów - Francuzów, Włochów, Holendrów, Anglików, Norwegów, a od czasu do czasu pojawiał się z wizytą jankes. Porozumiewali się łamaną angielszczyzną i płynnym „akceleranto”. Fizycy doświadczalnicy tworzyli drugi zespół; jego zadanie polegało na zbudowaniu detektora, któremu w przyływie twórczego natchnienia nadano nazwę UA-1. Detektor ten miał umożliwić obserwowanie zderzeń protonów z antyprotonami.

Jeden z członków grupy pracującej nad wytwarzaniem antyprotonów, holenderski inżynier Simon van der Meer, wynalazł metodę ściskania tych cennych obiektów tak, by zajmowały niewielką przestrzeń w pierścieniu, w którym się je przechowuje. Wynalazek, zwany chłodzeniem stochastycznym, wyraźnie pomógł gromadzić antyprotony, dzięki czemu osiągnięto przyzwoitą liczbę zderzeń, czyli około 50 tysięcy na sekundę. Rubbia, doskonały technokrata, popędzał swój zespół, zdobywał poparcie, zajmował się marketingiem, telefonami, promocją i podróżami. Prelekcje wygłaszał w tempie karabinu maszynowego, wyświetlając po pięć przezroczy w ciągu minuty. Te referaty były kunsztownym zlepkiem pochlebstw, tupetu oraz podanej napuszonym stylem treści.

Carlo i goryl

Dla wielu fizyków Carlo Rubbia to wzór naukowca-herosa. Kiedyś przypadł mi w udziale zaszczyt przedstawienia go w czasie bankietu dla licznie zgromadzonych uczestników międzynarodowej konferencji w Santa Fe. Rubbia miał wygłosić przemówienie (było to już po tym, jak otrzymał Nagrodę Nobla za znalezienie cząstek W i Z). Zrobiłem to, opowiadając krótką historyjkę.

Podczas ceremonii rozdawania Nagród Nobla w Sztokholmie król Olaf odciągnął Carla na bok i mówi mu, że pojawił się pewien problem. Na skutek niedopatrzenia mają w tym roku do wręczenia tylko jeden złoty medal. Dlatego król przygotował trzy namioty i wyznaczył trzy zadania do spełnienia. Złoto otrzyma ten z laureatów, który najlepiej sobie z nimi poradzi. W pierwszym namiocie stoją cztery litry śliwownicy - dowiedział się Carlo. Na wypicie wszystkiego ma 20 sekund. W drugim namiocie znajduje się goryl, który nic nie jadł od trzech dni, gdyż boli go ząb mądrości. Zadanie: usunąć dokuczliwy ząb. Czas: 40 sekund. W trzecim namiocie kryje się najbardziej utalentowana z kurtyzan służących w irackiej armii. Zadanie: zaspokoić ją całkowicie. Czas: 60 sekund.

Na sygnał startu Carlo pomknął do pierwszego namiotu. Rozległ się bulgot i po 18,6 sekundy Carlo dumnie pokazał cztery puste butelki.

Nie tracąc ani chwili, heroiczny Carlo chwiejnym krokiem sunie do drugiego namiotu. Po chwili dobiega z niego straszliwy ryk, po którym zapada przejmująca cisza. Po 39,1 sekundy wytacza się stamtąd Rubbia i pyta: „No dobra, to gdzie jest ten goryl z bolącym zębem?”

Słuchacze wybuchnęli gromkim śmiechem, być może dlatego, że obficie raczyli się konferencyjnym winem. Wreszcie przedstawiłem Rubbię, który mijając mnie w drodze do podium szepnął: „Nie zrozumiałem, wyjaśnisz mi później”.

Rubbia nie znosił dowcipnisiów, a jego skłonność do rządów twardej ręki powodowała konflikty. Wkrótce po otrzymaniu przez Rubbię Nagrody Nobla, Gary Taubes napisał o nim książkę: *Nobel Dreams (Marzenia o Noblu)*. Nie była ona pochlebna. Kiedyś podczas zajęć zimowej szkółki, gdy wśród słuchaczy znajdował się Rubbia, oznajmiłem, że sprzedano już prawa do ekranizacji tej książki i że Sydney Greenstreet, którego obwód w talii był mniej więcej taki jak Rubbii, miał zagrać jego rolę. Ktoś zauważył, że Greenstreet już nie żyje, ale poza tym byłby całkiem niezły. Podczas innego zgromadzenia, w czasie letniej konferencji na Long Island, ktoś postawił na plaży znak: „Pływanie uzbrojone. Carlo korzysta z oceanu!”

Rubbia był niezwykle wymagający. Nieustannie ponaglał budowniczych składających monstrualne magnesy detektora, który miał wykrywać i analizować zdarzenia z udziałem 50-60 cząstek wyłaniających się ze zderzeń protonów i antyprotonów o energii 270 GeV. Równie dobrze się znał i z takim samym zaangażowaniem uczestniczył w budowie urządzenia gromadzącego antyprotony - pierścienia AA - w którym chciano wykorzystać wynalazek van der Meera. Pierścień AA miał stanowić wydajne źródło antyprotonów, wstrzykiwanych następnie do akceleratora SPS w celu ich przyspieszenia. Ten ostatni pierścień musiał mieć wnęki o częstościach radiowych, wzmocniony układ chłodzenia wodą i specjalnie wyposażone pomieszczenie, w którym miano zmontować detektor UA-1. Aby poddać Rubbię jakiejś kontroli, władze CERN zarządziły budowę niezależnego i konkurencyjnego detektora, oczywiście UA-2. UA-2 był w tej sytuacji

Kopciuszkiem, ale budował go zespół młodych i pełnych entuzjazmu fizyków. Ograniczeni niewielkim budżetem zaprojektowali zupełnie inny rodzaj detektora.

Trzecią funkcją Rubbii było wzbudzenie entuzjazmu wśród władz CERN, podtrzymywanie zainteresowania światowej opinii publicznej i przygotowanie sceny dla wielkiego eksperymentu poświęconego cząstce W . Cała Europa sekundowała temu przedsięwzięciu, bo miało ono oznaczać nadejście nowej epoki w nauce europejskiej. Jeden z dziennikarzy twierdził, że porażka „zmiotłaby papieży i premierów”.

Eksperyment rozpoczął się w 1981 roku. Wszystko było na swoim miejscu - UA-1, UA-2, pierścień AA - sprawdzone i gotowe. Pierwsze próbne cykle eksperymentu, mające na celu przetestowanie całego skomplikowanego układu akceleratora i detektorów, były stosunkowo owocne. Towarzyszyły im wycieki, błędy i wypadki, ale w końcu pojawiły się dane! A wszystkie na nowym, wyższym poziomie złożoności. Laboratorium w Genewie poświęciło wszystkie środki i siły, żeby uzyskać jakieś rezultaty przed konferencją rochesterską, która miała się odbyć w Paryżu w roku 1982.

O ironio, to właśnie UA-2, ten dodatkowy detektor, jako pierwszy wywołał sensację wykrywając dżety - wąskie wiązki hadronów, które świadczyły o tym, że są produkowane kwarki. UA-1, będący wciąż jeszcze na etapie prób, przegapił to odkrycie. Zawsze gdy Dawid pokonuje Goliata, wszyscy - oprócz tego ostatniego - czują się pokrzepieni na duchu. W tym wypadku Rubbia, który nie znosi przegrywać, przyznał, że zaobserwowanie dżetów było prawdziwym sukcesem CERN i że cały wysiłek włożony w konstrukcję maszyn, detektorów i oprogramowania przyniósł efekty w postaci istotnego tropu. Wszystko się zgadzało: skoro widziano dżety, wkrótce powinny pojawić się cząstki W .

Przejażdżka na numerze 29

Być może wyimaginowana podróż najlepiej zilustruje sposób działania detektorów. Przeniesiemy się do detektora CDF, ponieważ jest nowocześniejszy od UA-1, choć ogólne zasady działania wszystkich detektorów typu 4-pi są jednakowe. (Cztery pi - 4π oznacza, że detektor ze wszystkich stron otacza punkt, w którym dochodzi do zderzenia). Pamiętaj, drogi Czytelniku, że podczas zderzenia protonu z antyprotonem cząstki rozpryskują się na wszystkie strony. Przeciętnie jedna trzecia z nich jest neutralna, reszta - naładowana. Nasze zadanie polega na tym, by dowiedzieć się dokładnie, gdzie każda cząstka leci i co robi. Jak w każdym przypadku fizycznej obserwacji, można odnieść tylko częściowy sukces.

Udajmy się na przejażdżkę na jednej z cząstek. Powiedzmy, że zostawia ona ślad oznaczony numerem 29. Wylatuje pod pewnym kątem do kierunku zderzających się cząstek, napotyka cieką metalową ścianę komory próżniowej, przedostaje się przez nią bez przeszkód i przez następne 50 cm wędruje przez gaz, w którym jest mnóstwo bardzo cienkich złotych drucików. Choć nie informują o tym żadne znaki drogowe, jest to terytorium Charpaka. Cząstka może minąć 40 lub 50 takich drutów, zanim dotrze do końca tej komory. Jeśli jest naładowana, każdy z mijanych przez nią drucików zarejestruje jej przejście i pozwoli na ocenienie odległości dzielącej cząstkę od drucika. Zebrała informacja pochodząca od wielu drucików pozwala określić tor cząstki. Ponieważ komora drutowa umieszczona jest w silnym polu magnetycznym, tor naładowanej

cząstki ulega zakrzywieniu i pomiar promienia tej krzywizny (dokonuje go komputer) pozwala fizykom poznać pęd cząstki numer 29.

Następnie cząstka przechodzi przez cylindryczną ścianę, ograniczającą magnetyczną komorę drutową, i wpada do sektora kalorymetru, gdzie mierzy się jej energię. Teraz dalsze zachowanie cząstki zależy od tego, czym ona jest. Jeśli jest elektronem, to fragmentuje na serii leżących blisko siebie cienkich płyt ołowianych, oddając całą swą energię wrażliwym detektorom, które tkwią w ołowianych kanapkach jak plasterki wędliny. Komputer dostrzega, że cząstka numer 29 zatrzymuje się po przebyciu w ołowianym kalorymtrze scyntylacyjnym 7-10 cm i stwierdza: elektron! Jeśli jednak jest to hadron, to zanim wyczerpie całą swą energię, wniknie w kalorymetr na 25-50 cm. W obu wypadkach energię się mierzy i porównuje z danymi o pędzie, otrzymanymi na podstawie pomiaru promienia krzywizny ruchu cząstki w komorze drutowej. Komputer łaskawie pozwala uczonemu wyciągać ostateczne wnioski.

Jeśli cząstka numer 29 jest neutralna, nie pozostawia żadnego śladu w komorze drutowej. Gdy pojawia się w kalorymtrze, zachowuje się w zasadzie tak samo jak cząstka naładowana. W obu wypadkach dochodzi do zderzeń z jądrami atomów tworzywa, z którego wykonany jest kalorymetr. Odłamki pochodzące z tych zderzeń powodują dalsze zderzenia, tak długo, aż wyczerpany zostanie cały początkowy zasób energii. Możemy więc rejestrować i mierzyć energię cząstek neutralnych, ale nie możemy badać ich pędu i dlatego nie potrafimy precyzyjnie określić kierunku ich ruchu, ponieważ nie zostawiają żadnych śladów w komorze drutowej. Jedną z cząstek neutralnych - foton - łatwo jest zidentyfikować dzięki temu, że ulega stosunkowo szybkiej absorpcji w ołowiu, podobnie jak elektron. Inna cząstka neutralna - neutrino - opuszcza detektor, unosząc pęd oraz energię i nie pozostawiając po sobie nawet najmniejszego śladu. Wreszcie mion oddaje w kalorymtrze nieznaczną część swej energii (nie podlega silnym zderzeniom jądrowym). Gdy wylania się z kalorymetru, napotyka 75-150 cm żelaza, przenika je i ląduje w detektorze mionów: w komorze drutowej albo w liczniku scyntylacyjnym. W ten właśnie sposób oznaczamy miony.

Podobnie postępujemy ze wszystkimi 47 cząstkami (czy z jakąś inną ich liczbą) pojawiającymi się na skutek każdego zderzenia. System zbiera dane dotyczące zderzenia - blisko milion bitów informacji o każdym zderzeniu, co jest równoważne informacji zawartej w stustronicowej książce. System gromadzenia danych musi szybko zdecydować, czy zdarzenie jest interesujące, czy też nie. Musi je odrzucić lub zachować w pamięci buforowej i przygotować wszystkie rejestry do analizy następnych zderzeń. Jeśli akcelerator pracuje jak należy, do następnego zderzenia dochodzi zazwyczaj po upływie miliardowej części sekundy. W ostatnim zakończonym cyklu eksperymentalnym teatronu (1990-1991) całkowita ilość zebranej informacji odpowiadała milionowi powieści albo pięciu tysiącom kompletów *Encyclopaedia Britannica*.

Niektóre spośród powstałych w zderzeniu cząstek mają bardzo krótki czas życia. Mogą przelecieć zaledwie kilka dziesiątych centymetra od punktu zderzenia w komorze próżniowej, po czym ulegają spontanicznemu rozpadowi. Cząstki W i Z żyją tak krótko, że nawet nie ma możliwości zmierzenia długości toru ich lotu. O ich istnieniu wnioskuje się na podstawie analizy cząstek, którym dają początek. Zazwyczaj kryją się one wśród odłamków, które wylatują z każdego zderzenia. Ponieważ cząstki W są masywne, produkty ich rozpadu mają większą energię i dzięki temu można je łatwiej zlokalizować. Tak egzotyczne obiekty, jak kwark t czy bozon Higgsa, mają określony zbiór możliwych

sposobów rozpadu, które trzeba będzie wypatrzeć pośród mnóstwa wyłaniających się cząstek.

Proces przetwarzania ogromnych ilości elektronicznych danych na wnioski dotyczące przebiegu zderzeń wymaga kolosalnego wysiłku. Trzeba sprawdzić dziesiątki tysięcy sygnałów. Dziesiątki tysięcy linii kodu należy porównać ze znanymi rodzajami zderzeń. Nic dziwnego, że nie obejdziesz się bez całego batalionu specjalistów o wysokich kwalifikacjach i motywacji (nawet jeśli oficjalnie niektórzy z nich są tylko doktorantami czy asystentami), uzbrojonych w potężne komputery i precyzyjne programy analizujące. A i tak potrzeba dwóch czy trzech lat pracy, by w pełni przeanalizować wszystkie dane zebrane w czasie jednego cyklu pracy tevatronu.

Triumf

W CERN, miejscu narodzin fizyki zderzających się wiązek, wszystko zadziało jak należy, potwierdzając słuszność założeń projektu. W styczniu 1983 roku Rubbia ogłosił odkrycie cząstki W . Zarejestrowano pięć wyraźnych zdarzeń, które można było zinterpretować jedynie jako produkcję i rozpad obiektu W .

Dzień czy dwa później zespół UA-2 doniósł o zarejestrowaniu czterech kolejnych zdarzeń. W obu przypadkach eksperymentatorzy musieli przeanalizować około miliarda zderzeń, w wyniku których powstawały najrozmaitsze rodzaje jądrowych odłamków. Jak zatem można przekonać siebie i liczne grono sceptyków? Szczególny rodzaj rozpadu cząstki W , który stwarzał największe nadzieje na jej odkrycie, wygląda tak: $W^+ \rightarrow e^+ + \text{neutrino}$ albo $W^- \rightarrow e^- + \text{antyneutrino}$. W trakcie drobiazgowej analizy zdarzeń tego typu trzeba udowodnić, że: (1) pojedynczy obserwowany ślad jest rzeczywiście elektronem, a nie czymś innym; (2) energia elektronu stanowi około połowy masy cząstki W . Wielkość „brakującego pędu”, uniesionego przez niewidoczne neutrino, można obliczyć dodając pędy wszystkich obserwowanych w zdarzeniu cząstek i przyrównując go do zera - całkowitego początkowego pędu zderzających się cząstek. Do dokonania tego odkrycia w dużej mierze przyczynił się szczęśliwy traf, że - dzięki parametrom akceleratora w CERN - produkowane cząstki W znajdowały się niemal w spoczynku. Żeby odkryć cząstkę, należy spełnić mnóstwo warunków. Bardzo ważne jest, aby ze wszystkich zderzeń wynikała (w granicach dopuszczalnego błędu) ta sama wartość masy cząstki W .

Rubbii przypadł zaszczyt przedstawienia wyników pracownikom CERN. Referując je był - o dziwo! - przejęty. Zbierał owoce ośmiu lat ciężkiej pracy. Jego przemowa była spektakularna. Dysponował wszelkimi danymi i talentem, by przedstawić je z pełną pasją logiką (!). Nawet jego przeciwnicy uczestniczyli w owacji. Europa - w osobach Rubbii i van der Meera - dostała wymarzonego Nobla w 1985 roku.

Po blisko sześciu miesiącach od odkrycia W pojawiły się pierwsze dane świadczące o istnieniu neutralnej cząstki Z^0 . Pozbawiona ładunku cząstka Z może rozpadać się na wiele sposobów, na przykład na parę e^+ i e^- (albo parę mionów μ^+ i μ^-). Dlaczego? Dla tych, którzy przespali poprzednią część, powtarzam, że ponieważ Z jest neutralne, ładunki cząstek pojawiających się w wyniku rozpadu muszą w sumie dawać zero. Dlatego kandydatami na produkty rozpadu są cząstki o przeciwnych znakach. Cząstkę Z jest łatwiej rozpoznać niż W , ponieważ można dokładnie zmierzyć parametry pary elek-

tron-pozyton albo pary mionów, trudność jednak leży w tym, że Z jest cięższa od W i dlatego rzadziej powstaje. Ale i tak pod koniec roku 1983 istnienie Z^0 zostało potwierdzone przez oba detektory: UA-1 i UA-2. Odkrycie cząstek W i Z oraz upewnienie się, że mają dokładnie takie masy, jak to przewidywała teoria oddziaływania elektroslabego - jednocząca oddziaływania elektromagnetyczne i słabe - było silnym argumentem na rzecz tej teorii.

Zwieńczenie modelu standardowego

Do roku 1992 zarejestrowano w UA-1 i UA-2 oraz w nowym dziecku tevatronu - detektorze CDF - tysiące zdarzeń z udziałem cząstek W . Wiadomo teraz, że masa W wynosi $79,31 \text{ GeV}^1$. W CERN zebrano około dwóch milionów cząstek Z^0 w tak zwanej fabryce cząstek Z^0 , czyli w LEP (Large Electron-Positron Storage Ring) - kołowym akceleratorze elektronów, którego obwód ma 27 kilometrów. Zmierzono masę tej cząstki. Wynosi ona $91,188 \text{ GeV}$.

Niektóre akceleratory stały się fabrykami cząstek. Pierwsze z nich - w Los Alamos, Vancouver i Zurychu - wytwarzały piony. W Kanadzie obecnie projektuje się wytwórnię kaonów. Hiszpania pragnie mieć fabrykę taonów i kwarków powabnych. Złożono już trzy czy cztery propozycje budowy wytwórni kwarków b , a fabryka cząstek Z^0 w CERN w 1992 roku działała już pełną parą. W SLAC mniejsze przedsięwzięcie tego typu zasługuje raczej na miano warsztatu lub butik.

Po co nam te fabryki? Dzięki nim można bardzo szczegółowo badać, co się dzieje podczas produkcji cząstek, zwłaszcza tych bardziej masywnych, które rozpadają się na wiele różnych sposobów. Chcemy zdobyć wiele tysięcy próbek zdarzeń każdego typu. Ciężka cząstka Z^0 przestaje istnieć na wiele sposobów, z których można się sporo dowiedzieć o słabym i elektroslabym oddziaływaniu. Bardzo pouczające jest także zwracanie uwagi na to, czego tam nie ma. Jeśli na przykład masa kwarka t jest mniejsza niż połowa masy Z^0 , to mamy (obowiązkową) reakcję $Z^0 \rightarrow t + \text{anty-}t$. Oznacza to, że Z^0 , wprawdzie rzadko, ale może się rozpaść na mezon składający się z kwarka t złączonego ze swym antykwarkiem. Jak już wspominałem, jest znacznie bardziej prawdopodobne, że rozpadnie się na parę elektron-pozyton, parę mionów czy mezon złożony z kwarków b i $\text{anty-}b$. Teoria odniosła wielki sukces w przewidywaniu prawdopodobieństwa pojawiania się tych par, dlatego wierzymy, że równie trafnie przewiduje szanse powstania cząstki t i $\text{anty-}t$. Jeśli wytworzymy dostatecznie dużo cząstek Z^0 , to zgodnie z rachunkiem prawdopodobieństwa możemy się spodziewać, że znajdziemy dane świadczące o istnieniu kwarka t . Jednak pośród milionów cząstek Z^0 , powołanych do życia w CERN, Fermilabie i innych miejscach, nie zaobserwowano jeszcze tego konkretnego rozpadu. Mówi nam to coś istotnego na temat kwarka t : jego masa musi być większa niż połowa masy cząstki Z^0 . Dlatego właśnie Z^0 nie może go wyprodukować.

¹ Najnowsze pomiary pozwoliły ustalić, że masa cząstki W równa się $80,33 \pm 0,17 \text{ GeV}$ (przyp. red.).

O co tu chodzi?

W swym dążeniu do osiągnięcia unifikacji teoretycy proponowali istnienie wielu hipotetycznych cząstek. Zazwyczaj ich własności, wyjąwszy masę, są dość dokładnie określone przez model. Jeśli nie obserwujemy tych egzotycznych cząstek, to możemy określić dolną granicę ich masy, zgodnie z zasadą, że im cięższa cząstka, tym trudniej ją wyprodukować.

Rozumowanie to opiera się na pewnej teorii. Teoretyk Lee mówi, że jeśli dysponujemy dostatecznie dużą energią, w zderzeniu protonu z antyprotonem może powstać hipotetyczna cząstka: nazwijmy ją Lee-on. Jednak prawdopodobieństwo - albo względna częstość pojawiania się Lee-onów - zależy od ich masy. Im są cięższe, tym rzadziej powstają. Teoretyk chętnie dostarczy nam wykres, na którym ukazana jest zależność między liczbą cząstek wyprodukowanych w ciągu jednego dnia, a ich masą. Na przykład, masa równa się 20 GeV - otrzymujemy 1000 Lee-onów dziennie (mnóstwo); 30 GeV - 2 Lee-ony; 50 GeV - jedna tysięczna Lee-ona. W tym ostatnim wypadku eksperyment musiałby trwać 1000 dni, by udało się nam odnotować jedno zdarzenie z udziałem poszukiwanej cząstki. Eksperymentatorzy zazwyczaj domagają się przynajmniej dziesięciu takich przypadków dziennie, ponieważ dodatkowe problemy sprawiają im kłopoty związane z wydajnością i tłem. Tak więc po zakończeniu cyklu eksperymentalnego trwającego, powiedzmy, 150 dni (czyli rok), w którym nie zanotowano żadnego zdarzenia, bierzemy do ręki wykres, znajdujemy na krzywej punkt odpowiadający 10/150, czyli pojawianiu się jednej cząstki w ciągu 15 dni, i okazuje się, że odpowiada on masie 40 GeV. Zgodnie z konserwatywną oceną należy przyjąć, że mogliśmy przeoczyć mniej więcej pięć zdarzeń. Zatem wykres mówi nam, że gdyby masa Lee-ona była mniejsza lub równa 40 GeV, powinniśmy zarejestrować słaby sygnał w postaci kilku zdarzeń. A my nic nie zanotowaliśmy. Wniosek: masa Lee-ona jest większa niż 40 GeV.

Co dalej? Jeśli Lee-on - albo kwark t , albo cząstka Higgsa - są w ogóle warte zachodu, mamy do wyboru trzy strategie. Pierwsza: przeprowadzić dłuższy eksperyment (ale to nie jest najlepszy sposób). Druga: zwiększyć ilość zderzeń na sekundę, czyli zwiększyć świetlność. Racja! To jest właśnie to, co robi się w Fermilabie w latach dziewięćdziesiątych, z zamiarem stukrotnego zwiększenia częstości zderzeń. Jeśli tylko w zderzeniu uczestniczy dostatecznie dużo energii (1,8 TeV to jest już dostatecznie dużo), zwiększanie świetlności bardzo pomaga. Trzecia strategia polega na zwiększaniu energii maszyny, dzięki czemu wzrasta prawdopodobieństwo wyprodukowania wszystkich ciężkich cząstek. Tę drogę wybrał nadprzewodzący superakcelerator.

Dzięki odkryciu cząstek W i Z , mamy już sześć kwarków, sześć leptonów i dwa naście bozonów cechowania (cząstek przenoszących oddziaływania). Są jeszcze pewne aspekty modelu standardowego, których dotąd nie omówiliśmy w pełni, ale zanim zbliżymy się do tajemnicy, poświęćmy chwilę samemu modelowi. Zapisany w postaci trzech generacji, objawia pewien rytm. Zauważmy także i inne prawidłowości. Wyższe generacje mają większą masę. Dzielące je różnice liczą się teraz, w naszym zimnym świecie, ale nie miały zupełnie znaczenia, gdy Wszechświat był młody i bardzo gorący. W młodym Wszechświecie wszystkie cząstki miały ogromne energie - miliardy TeV - toteż niewielka różnica w masie spoczynkowej nie odgrywała praktycznie żadnej roli. Kiedyś, dawno temu, wszystkie kwarki, leptony i inne cząstki występowały na równych

prawach. Z jakiegoś powodu wszystkie były tak samo kochane i potrzebne. Dlatego musimy je wszystkie traktować z równą powagą.

Z danych zebranych w CERN zdaje się wypływać jeszcze jeden wniosek: istnienie czwartej lub piątej generacji jest wielce nieprawdopodobne. Całkiem niezły wniosek, nieprawdaż? W jaki sposób naukowcy, pracujący pośród ośnieżonych szczytów, głębokich, lodowatych jezior i znakomitych restauracji, mogli dojść do tak przyziemnego wniosku?

Rozumowanie, które do niego wiedzie, jest dość eleganckie. Z^0 może się rozpadać na wiele sposobów. Każdy z nich, każda dodatkowa możliwość skraca nieco przeciętny czas życia cząstki. Jeśli jest wiele chorób, niebezpieczeństw, wrogów, ludzkie życie także ulega skróceniu. Ale to kiepska analogia. Każda możliwość nowego rozpadu otwiera przed Z^0 drogę wiodącą ku zagładzie. Całkowita suma wszystkich tych dróg determinuje czas życia. Zauważmy, że nie wszystkie cząstki Z^0 mają taką samą masę. Teoria kwantowa mówi, że jeśli cząstka jest nietrwała - nie żyje wiecznie - to jej masa musi być co najmniej nieokreślona. Zasada Heisenberga określa, w jaki sposób czas życia wpływa na rozkład masy: długiemu czasowi życia odpowiada wąski rozkład masy, a krótkiemu - szeroki. Innymi słowy, im krótszy czas życia, tym słabiej określona masa i tym szerszy jej przedział. Teoretycy z przyjemnością przedstawiają nam wzór opisujący ten związek. Szerokość rozkładu masy można wyznaczyć bardzo łatwo, jeśli się ma do dyspozycji mnóstwo cząstek Z^0 i sto milionów franków szwajcarskich na zbudowanie detektora.

Jeśli suma energii elektronów i pozytonów uczestniczących w zderzeniu jest znacznie mniejsza od średniej masy cząstek Z^0 , czyli od 91,188 GeV, nie powstanie ani jedna cząstka Z^0 . Operator akceleratora zwiększa energię, którą maszyna nadaje cząstkom, aż wreszcie w pewnym momencie każdy z detektorów może zarejestrować jakąś liczbę cząstek pochodzących z rozpadu Z^0 . Jeśli dalej będzie zwiększał energię maszyny, zwiększy się także liczba rejestrowanych produktów rozpadu Z^0 . To jest po prostu powtórka eksperymentu, który doprowadził do odkrycia J/ψ w SLAC, ale w tym wypadku szerokość przedziału energii wynosi 2,5 GeV. Oznacza to, że maksimum rejestrowanych cząstek znajdujemy przy energii równej 91,188 GeV. Przy 89,9 i 92,4 GeV ich liczba jest o połowę mniejsza. (Może przypominasz sobie, drogi Czytelniku, że szerokość rozkładu masy J/ψ była znacznie mniejsza - około 0,05 MeV). Dzięki krzywej dzwonowej możemy obliczyć tę szerokość, która odpowiada czasowi życia. Każdy możliwy sposób rozpadu przyczynia się do skrócenia czasu życia i zwiększa szerokość prawie o 0,20 GeV.

Co to wszystko ma wspólnego z czwartą generacją? Zauważyliśmy, że w każdej generacji występuje neutrino o znikomej (albo zerowej) masie. Jeśli istnieje czwarta generacja - z neutrinem o niewielkiej masie - to Z^0 musiałoby się także rozpadać na neutrino ν_x i jego antycząstkę $\bar{\nu}_x$, należące do tej nowej generacji. Taka możliwość dodałaby 0,17 GeV do szerokości rozkładu masy. Dlatego starannie badano tę wielkość w wypadku cząstki Z^0 . Okazała się dokładnie taka, jaką przewidywał model standardowy z trzema generacjami. Tak więc dane dotyczące szerokości rozkładu masy wykluczają możliwość istnienia neutrino o znikomej masie należącego do czwartej generacji. Wyniki wszystkich czterech eksperymentów prowadzonych w LEP potwierdzają ten wniosek i dopuszczają jedynie trzy pary neutrin. Istnienie czwartej generacji o takiej samej strukturze, jak poprzednie trzy - zawierającej neutrino o niewielkiej lub zerowej masie - jest wykluczone ze względu na dane dotyczące cząstki Z^0 .

Trzeba tu dodać, że kosmolodzy sformułowali ten sam interesujący wniosek już wiele lat wcześniej, odwołując się do sposobu, w jaki neutrony i protony łączyły się, ażeby tworzyć pierwiastki chemiczne we wczesnej fazie rozszerzania się i stygnięcia Wszechświata po Wielkim Wybuchu. Stosunek ilości wodoru do helu zależy (nie będą tego wyjaśniał) od liczby gatunków neutrin. Dane dotyczące obfitości pierwiastków wyraźnie wskazują na istnienie trzech gatunków neutrin. A zatem badania prowadzone w LEP mają także pewne znaczenie dla naszego rozumienia, jak przebiegała ewolucja Wszechświata.

Tak oto mamy przed sobą niemal kompletny model standardowy. Brak tylko kwarka t . Nie znaleziono też neutrina taonowego, ale jak się przekonaaliśmy, nie stanowi to istotnego braku. Z grawitacją trzeba poczekać, aż teoretycy lepiej ją zrozumieją. No i, oczywiście, brakuje nam jeszcze bozonu Higgsa - Boskiej Cząstki.

Poszukiwania kwarka t

W roku 1990 przeprowadzono równoległe dwa eksperymenty: w akceleratorze w CERN i w CDF w Fermilabie. CDF dysponował trzykrotnie większą energią (1,8 TeV) niż CERN (620 GeV). Poprawiając nieco system chłodzenia miedzianych uzwojeń, CERN zdołał podnieść energię wiązek z 270 do 310 GeV. W ten sposób, aby nie wypaść z konkurencji, osiągnięto absolutny kres możliwości. Ale trzykrotnie niższa energia i tak boli. Na korzyść CERN przemawiało jednak dziewięcioletnie doświadczenie, dysponowanie odpowiednimi programami komputerowymi i znajomość sposobów analizy danych. Ponadto w CERN, wykorzystując pewne pomysły z Fermilabu, poprawiono źródło antyprotonów, dzięki czemu osiągnano tam nieco większą częstość zderzeń niż u nas, w CDF. Na przełomie lat 1989-1990 detektor UA-1 przeszedł na zasłużony odpoczynek. Rubbia był dyrektorem naczelnym CERN, który dbał o przyszłość całego laboratorium, dlatego detektorowi UA-2 wyznaczył zadanie: znaleźć kwark t . Ubocznym celem badań było dokładniejsze zmierzenie masy cząstki W , bo jest to parametr o kluczowym znaczeniu dla całego modelu standardowego.

Do końca roku 1990 żadna z grup nie uzyskała danych świadczących o istnieniu kwarka t , ale „wyścig” i tak się skończył, gdyż CERN w zasadzie już wypadł z gry. Obie grupy interpretowały brak sygnału w kategoriach nieznannej wartości masy kwarka t . Jak już mówiłem, jeśli nawet nie znajdzie się jakiejś cząstki, i tak możemy się dzięki temu dowiedzieć czegoś o jej masie. Teoretycy wiedzieli wszystko o sposobach produkcji kwarka t i jego rozpadzie; nie znali tylko jego masy. Prawdopodobieństwo wyprodukowania cząstki jest ściśle związane z jego masą. Fermilab i CERN zgodnie ustaliły, że kwark t musi mieć masę większą niż 60 GeV.

CDF kontynuował zbieranie danych i z wolna wysoka energia akceleratora pracującego w Fermilabie zaczęła przynosić efekty. Jeden z cykli eksperymentu trwał jedenaście miesięcy. W tym czasie zarejestrowano ponad sto miliardów zderzeń, ale nie znaleziono kwarka t . Stwierdzono jedynie, że jego masa musi sięgać co najmniej 91 GeV - osiemnastokrotnie więcej niż masa kwarka b . Ten zaskakujący rezultat zaniepokoił wielu teoretyków pracujących nad zunifikowaną teorią. Zgodnie ze stworzonymi przez nich modelami, kwark t powinien być znacznie lżejszy. Z tego powodu niektórzy teoretycy zaczęli darzyć go szczególnym zainteresowaniem. Pojęcie masy jest w pewien sposób związane z Higgsem. Czy ciężar kwarka t może stanowić jakąś wskazów-

kę? Nie dowiemy się tego, póki go nie znajdziemy, nie zmierzmy jego masy i nie podamy najrozmaitszym doświadczeniom.

Teoretycy powrócili do swych obliczeń. Okazało się, że nic nie zagraża modelowi standardowemu, gdyż maksymalna dopuszczalna masa kwarka wynosi 250 GeV; cięższy kwark stwarzałby wyraźny problem. W doświadczeniach odżył zapał do poszukiwania kwarka t . Jeśli jednak jego masa przekraczała 91 GeV, CERN całkowicie wypadł z gry. Maszyny elektronowe mają zbyt małą energię i dlatego są bezużyteczne. Ze wszystkich urządzeń na świecie tylko tawatron pozostał na placu gry. Należało jednak pięciokrotnie, a nawet pięćdziesięciokrotnie, zwiększyć częstość zderzeń.

Model standardowy to chwiejna podstawa

Moje ulubione przezrocze przedstawia odziane w białe szaty bóstwo z aureolą nad głową. Bóstwo przygląda się „Maszynie Wszechświata”. Ma ona około dwudziestu dźwigni - każdą z nich można ustawić w jednym z kilku położeń - oraz przełącznik opatrzony napisem: „Naciśnij, a stworzysz Wszechświat”. (Zaczerpnąłem ten pomysł od jakiegoś studenta, który na łazienkowej suszarce do rąk napisał: „Naciśnij, a usłyszysz wiadomość od dziekana”). Chodzi o to, że aby stworzyć Wszechświat, trzeba określić wartości około dwudziestu parametrów. Co to za liczby? Potrzebujemy tuzina liczb, by ustalić masy kwarków i leptonów. Potrzebujemy trzech liczb, by zadekretować moc oddziaływań (czwarte oddziaływanie - grawitacja - nie należy do modelu standardowego, przynajmniej na razie). Potrzebujemy także kilku liczb, by pokazać, jak jedno oddziaływanie wiąże się z innym. Przyda się też liczba określająca złamanie symetrii CP , masę cząstki Higgsa i kilka innych pożytecznych rzeczy.

Mając te podstawowe liczby, możemy z nich wyprowadzić wszystkie inne potrzebne nam parametry, na przykład 2 w wykładniku w prawie odwrotnych kwadratów, masę protonu, rozmiar atomu wodoru, budowę cząsteczki wody, podwójną spiralę DNA, temperaturę zamrażania wody i dochód narodowy brutto osiągnięty przez Albanie w 1995 roku. Nie mam pojęcia, jak otrzymać większość z wyżej wymienionych liczb, ale od czego mamy te ogromne komputery...

Nasze dążenie do prostoty sprawia, że niechętnie patrzymy na model Wszechświata, w którym trzeba określić aż 20 parametrów. Żaden szanujący się Bóg nie zorganizowałby w ten sposób maszyny do stwarzania wszechświatów. Jeden parametr, może dwa! Innymi słowy, nasze doświadczenie ze światem przyrody sprawia, że spodziewamy się bardziej eleganckiego rozwiązania. To na tym, jak już wielokrotnie narzekaliśmy, polega prawdziwy problem z modelem standardowym. Oczywiście, wciąż jeszcze czeka nas mnóstwo pracy, aby dokładnie określić te parametry. Sam problem wszakże jest natury estetycznej: sześć kwarków, sześć leptonów, dwanaście nośników oddziaływania; kwarki występują w trzech kolorach, a do tego wszystkiego dochodzą jeszcze antycząstki. I gdzieś w zakamarkach czai się grawitacja. Gdzie się podział Tales, teraz, kiedy naprawdę by się przydał?

Dlaczego grawitacja nie należy do modelu? Bo nikomu jeszcze się nie udało jej - ogólnej teorii względności - zmusić, by zgodziła się z teorią kwantową. Zagadnienie to jest jednym z głównych zadań stojących przed teoretykami w latach dziewięćdziesiątych. Żeby opisać Wszechświat w jego obecnej, wielkiej skali, nie potrzebujemy teorii kwantowej; ale dawno, dawno temu, kiedy cały Wszechświat miał rozmiary nie większe

niż atom, a nawet był znacznie od niego mniejszy, nadzwyczajnie słabe oddziaływanie grawitacyjne dysponowało wielką mocą dzięki ogromnej energii cząstek, z których powstały wszystkie planety, gwiazdy i galaktyki. Tym pierwotnym wirem musiały rządzić zasady fizyki kwantowej, ale nie wiemy, w jaki sposób. Teoretycy uważają mariaż ogólnej teorii względności z teorią kwantową za centralny problem współczesnej fizyki. Próby teoretycznego rozwiązania tego zagadnienia znane są jako supergrawitacja, supersymetria, superstruny czy Teoria Wszystkiego.

Mamy w nich do czynienia z wyrafinowanymi obliczeniami matematycznymi, które mogą zadziwić wielu - nawet najlepszych - matematyków świata. W teoriach tych mówi się o dziesięciu wymiarach: dziewięciu wymiarach przestrzennych i jednym wymiarze czasowym. My żyjemy w czterech wymiarach; w trzech wymiarach przestrzennych (wschód-zachód, północ-południe oraz góra-dół) i w jednym wymiarze czasowym. W żaden sposób nie potrafimy wyobrazić sobie więcej niż trzech wymiarów przestrzennych. Nie szkodzi. Dodatkowych sześć wymiarów uległo zwinięciu do niewyobrażalnie małych rozmiarów, tak że nie ma po nich nawet śladu w znanym nam świecie.

Współcześni teoretycy mierzą bardzo wysoko: szukają teorii, która opisywałaby pierwotną prostotę niewyobrażalnego żaru panującego w bardzo młodym Wszechświecie; szukają teorii pozbawionej parametrów. Wszystko ma się wyłonić z podstawowego równania, wartości parametrów mają wynikać z teorii. Jednak problem tkwi w tym, że jedyna kandydatka do miana teorii wszystkiego nie ma żadnego związku ze światem dostępnym obserwacjom; przynajmniej na razie. Choć w jednym drobnym przypadku teoria ta może mieć zastosowanie: chodzi o wymyśloną dziedzinę, zwaną przez koneserów masą Plancka. Jest to dziedzina, w której wszystkie cząstki we Wszechświecie mają energię tysiąc bilionów razy większą niż ta, którą spodziewamy się osiągnąć w nadprzewodzącym superakceleratorze. Nasza teoria sprawdza się tam przez około bilionową bilionowej bilionowej części sekundy. Wkrótce potem wszystko się miesza, pojawia się zbyt wiele możliwości i brak wyraźnej drogi rozwoju, która wskazywałaby na to, że my, ludzie, planety oraz galaktyki rzeczywiście jakoś z tej teorii wynikamy.

W połowie lat osiemdziesiątych Teoria Wszystkiego wydawała się szalenie pociągająca dla całych zastępów młodych teoretyków. Mimo ryzyka długoletnich poświęceń, które mogły nie przynieść żadnych istotnych efektów, ruszyli śladem przywódców (niczym lemingi, można powiedzieć) na poszukiwanie masy Plancka. My, którzy pozostaliśmy w domu - w Fermilabie i w CERN - nie dostaliśmy żadnych kartek z podróży. Lecz po pewnym czasie w szeregi teoretyków zaczęło się wkradać zniechęcenie. Niektórzy z wyznawców Teorii Wszystkiego rezygnowali, a wkrótce zaczęły nadjeżdżać autobusy pełne zawiedzionych teoretyków szukających czegoś konkretnego do policzenia. Cała przygoda jeszcze się nie zakończyła, ale obecnie przebiega znacznie spokojniej. Jednocześnie sprawdzane są nieco bardziej tradycyjne drogi wiodące do unifikacji.

Owe bardziej popularne drogi prowadzące do kompletnej, wszechobejmującej zasady noszą fantastyczne nazwy. Wymienię tylko kilka z nich: wielka unifikacja, modele preonowe, supersymetria i technicolor. Wszystkie te teorie mają jeden wspólny problem - brak danych! Z teorii grubym strumieniem wypływają przewidywania. Na przykład supersymetria (pieszczotliwie zwana Susy) przewiduje ni mniej, ni więcej tylko podwojenie liczby cząstek; jest to teoria, która cieszy się wśród teoretyków (gdyby głosowali; czego jednak nie robią) największym powodzeniem. Jak już mówiłem, kwarki i leptony, zbiorowo zwane fermionami, mają spin równy $1/2$, podczas gdy spin cząstek przenoszących oddziaływania, zwanych *en mass* bozonami, równa się 1. W Susy ta asymetria została

usunięta: zaproponowano, że dla każdego fermionu istnieje bratni bozon i na odwrót. Nazwy są wprost fantastyczne. Partner przydzielony przez Susy elektronowi nosi imię selektronu, a superbracia leptonów są nazywani sleptonami. Partner kwarka to skwark. Półspinowi odpowiednicy całospinowych bozonów otrzymali przyrostek „-ino”. Tak więc gluonom towarzyszą gluina, a fotonom - fotina. Mamy też Wino (od cząstki W) i Zino. Ta teoria jest nie tylko uroczą, jest także popularna.

Poszukiwania win i skwarków będą trwały w latach dziewięćdziesiątych. W tym czasie tawatron zwiększy swą moc i zaczną pracować urządzenia XXI wieku. Budowany w Teksasie nadprzewodzący superakcelerator (SSC) umożliwi eksplorację „obszaru mas” dochodzących do 2 TeV. Definicja obszaru mas jest bardzo luźna, wiele zależy od szczegółów reakcji, w której powstaje nowa cząstka. Jednak oznaką potęgi SSC jest to, że jeśli nie uda się znaleźć żadnych cząstek przewidywanych przez Susy, większość jej zwolenników porzuci teorię, publicznie łamiąc swoje ołówki.

Przed SSC stoi także inne zadanie: misja bardziej nie cierpiąca zwłoki niż szukanie skwarków i sleptonów. Model standardowy, będący zwięzłym streszczeniem całej naszej wiedzy, ma dwa poważne defekty: estetyczny i konkretny. Nasz zmysł estetyczny mówi, że istnieje zbyt wiele cząstek i oddziaływań. Co gorsza, liczne cząstki różnią się między sobą w sposób przypadkowy masami. Nawet oddziaływania różnią się między sobą; głównie z tego powodu, że ich nośniki mają różne masy. Problem konkretny wiąże się z niespójnością całego modelu standardowego. Jeśli zwrócimy się do teorii pola - imponująco zgodnej ze wszystkimi danymi doświadczalnymi - z prośbą, by przewidziała wyniki eksperymentów odbywających się przy bardzo wysokich energiach, otrzymamy rezultaty całkowicie absurdalne z fizycznego punktu widzenia. Oba problemy można naświetlić - a nawet, przypuszczalnie, rozwiązać - za pomocą obiektu (oraz oddziaływania), który trzeba bez dalszego ociągania włączyć do modelu standardowego. Obiekt i oddziaływanie noszą to samo imię: Higgs.

I wreszcie...

„Wszelkie widzialne przedmioty są jedynie papierowymi maskami. Ale w każdym wydarzeniu [...] jakowaś rzecz nie znana, a przecie rozumna ukazuje kształt swego oblicza spoza nierozumnej maski. Jeśli człek chce ugodzić, niech godzi poprzez maskę” - stwierdza kapitan Ahab.¹

Jedną z najwspanialszych powieści amerykańskich jest *Moby Dick* Hermana Melville'a. Również jedną z najbardziej przygnębiających - przynajmniej z punktu widzenia kapitana. Przez setki stron książki śledzimy misję Ahaba, który pragnie wytropić i upolować wielkiego ssaka oceanicznego o imieniu Moby Dick. Ahab zapamiętał się w swym gniewie. Szuka zemsty, ponieważ wieloryb odgryzł mu nogę. Niektórzy krytycy twierdzą, że wieloryb odgryzł mu coś więcej, co usprawiedliwiłoby zaciętość dobrego kapitana. Ahab tłumaczy swojemu pierwszemu oficerowi, Starbuckowi, że Moby Dick jest czymś więcej niż wielorybem. To papierowa maska, reprezentująca ukrytą głębiej

¹ Przekład Bronisława Zielińskiego, Czytelnik, Warszawa 1954.

siłę przyrody, siłę, której Ahab musi stawić czoło. Dlatego przez setki stron książki Ahab i jego ludzie miotają się po oceanie, przeżywają rozmaite przygody i zabijają wiele mniejszych wielorybów o różnych masach. W końcu pojawia się on: wielki biały wieloryb! I wtedy akcja nabiera tempa. Wieloryb topi Ahaba, zabija resztę załogi, a na domiar złego zatapia statek. Koniec historii. Kompletne fiasko. Być może Ahabowi przydałby się większy harpun, którego odmówiono mu ze względu na dziewiętnastowieczne ograniczenia budżetowe. Nie pozwólmy, by nam przydarzyło się coś podobnego. Moby Częstka jest w zasięgu strzału.

■

Musimy zadać pytanie, które dotyczy naszego modelu standardowego: czy jest on tylko tekturową maską? Jak to jest możliwe, by teoria potwierdzała wszelkie dane eksperymentalne przy niskich energiach, przy wysokich zaś przewidywała kompletne bzdury. Cóż, zapewne teoria nie uwzględnia jakiegoś nowego zjawiska, które ma doprawdy niewielkie znaczenie przy energiach osiąganych na przykład w Fermilabie i nie neguje zgodności teorii z danymi eksperymentalnymi. Przykładem tego, co, być może, zostało pominięte, jest nowa cząstka lub zmiana zachowania oddziaływania. Te postulowane nowe czynniki muszą dawać zaniedbywalny wkład przy niskich energiach, ale znaczny przy energiach osiągalnych w superpotężnych akceleratorach czy jeszcze wyższych. Jeśli teoria nie uwzględnia tych czynników (bo nic o nich nie wiemy), dla wysokich energii otrzymujemy matematycznie sprzeczne rezultaty.

Przypomina to trochę fizykę Newtona, która działa bardzo dobrze w zastosowaniu do zwykłych zjawisk, ale dopuszcza możliwość przyspieszania ciał do nieskończonych prędkości. Ta niemożliwa do zaakceptowania konsekwencja zostaje usunięta z chwilą wprowadzenia szczególnej teorii względności Einsteina. Teoria względności daje nieskończenie małe efekty przy prędkościach, z jakimi poruszają się rakiety czy pociski. Jednak przy prędkościach zbliżonych do prędkości światła pojawia się nowe zjawisko: masa ciała zaczyna rosnać i osiągnięcie nieskończonej prędkości staje się niemożliwe. Przewidywania szczególnej teorii względności płynnie przechodzą w newtonowskie wyniki przy prędkościach niewielkich w porównaniu z prędkością światła. Słabość tego przykładu tkwi jednak w tym, że choć pojęcie nieskończonej prędkości mogło niepokoić fizyków klasycznych, to nie jest ono nawet w części tak przerażające, jak to, co się dzieje z modelem standardowym przy wysokich energiach. Wkrótce do tego powrócimy.

Kryzys masowy

Już wcześniej sugerowałem, że funkcja cząstki Higgsa miałaby polegać na nadawaniu cząstkom masy i przez to - na ukrywaniu prawdziwej symetrii świata. To nowa i dziwaczna koncepcja. Dotychczas - jak się przekonaliśmy, studiując naszą mityczną historię poszukiwań demokrytejskiego atomu - gdy odkrywaliśmy kolejne, coraz głębsze struktury, zbliżaliśmy się do prostoty. Tak więc przeszliśmy od molekuł, przez atomy chemiczne, do jądra i protonu oraz neutronu (i ich licznych greckich krewnych), a wreszcie do kwarków. Na podstawie tego doświadczenia historycznego moglibyśmy się spodziewać, że teraz znów odkryjemy jakichś malców we wnętrzu kwarków, co jest całkiem możliwe. Ale tak naprawdę nie sądzimy, żeby w ten właśnie sposób ujawniła się długo oczekiwana teoria świata. Świat jednak bardziej przypomina kalejdoskop, o czym już wcześniej wspominałem, w którym lusterka przekształcają kilka okruchów koloro-

wych szkiełek w wielkie mnóstwo pozornie skomplikowanych wzorów. Ostatecznym celem Higgsa (to już nie nauka, lecz filozofia) mogłoby być stworzenie bardziej interesującego, bardziej złożonego świata, jak to sugeruje przypowieść otwierająca ten rozdział.

Nowością jest hipoteza, że cała przestrzeń zawiera pole - pole Higgsa - które przenika próżnię i jest wszędzie jednakowe. Oznacza to, drogi Czytelniku, że kiedy podziwiasz gwiazdy w bezchmurną noc, patrzysz przez pole Higgsa. Pod jego wpływem cząstki stają się masywne. Samo w sobie nie jest to niczym nadzwyczajnym, skoro cząstki mogą zyskiwać energię za sprawą omawianych wcześniej pól (cechowania), pola grawitacyjnego czy elektromagnetycznego. Jeśli wniesiesz kawał ołowiu na szczyt wieży Eiffla, zyskuje on energię potencjalną na skutek zmiany położenia w polu grawitacyjnym Ziemi. Ponieważ $E = mc^2$, ów przyrost energii potencjalnej jest równoważny przyrostowi masy. W danym przykładzie chodzi o wzrost masy układu Ziemia-kawał ołowiu.

W tym miejscu musimy delikatnie wprowadzić skomplikowaną interpretację sędziwego równania Einsteina. Masa, m , tak naprawdę składa się z dwóch części. Jedną z nich to masa spoczynkowa m^0 . To właśnie tę masę mierzy się w laboratorium, gdy cząstka znajduje się w stanie spoczynku. Drugi rodzaj masy jest nabywany podczas ruchu (dzieje się tak na przykład z protonem w tewatronie) lub za sprawą zwiększania się energii potencjalnej w polu. Podobną dynamikę obserwujemy w jądrze atomowym. Jeśli na przykład rozdzielimy proton i neutron, które razem składają się na jądro deuteru, suma ich mas wzrasta.

Jednak sposób, w jaki pole Higgsa nadaje cząstkom energię potencjalną, różni się pod kilkoma względami od działania innych, lepiej znanych nam pól. Masa, którą cząstki otrzymują od pola Higgsa, to masa spoczynkowa. Najbardziej intrygująca jest możliwość, że cała masa spoczynkowa pochodzi od tego pola. Inna różnica polega na tym, że różne cząstki „wysysają” z pola różną ilość masy. Teoretycy mówią, że rozmaite masy występujące w naszym modelu standardowym stanowią miarę siły sprzęgania się cząstki z polem Higgsa.

Wpływ, jaki Higgs wywiera na masy kwarków i leptonów, przypomina odkrycie Pietera Zeemana z 1896 roku. Mam na myśli rozszczepienie poziomów energetycznych elektronu umieszczonego w polu magnetycznym. Pole (odgrywające metaforyczną rolę Higgsa) łamie symetrię przestrzeni, którą zajmuje elektron. Pod wpływem magnesu jeden poziom energetyczny rozszczepia się na trzy. Poziom A zyskuje energię od pola, poziom B mu ją oddaje, a C wcale się nie zmienia. Oczywiście, wiemy już dokładnie, jak to się dzieje. To całkiem prosty efekt kwantowo-elektromagnetyczny.

Na razie nie wiemy, jakie reguły rządzą wzrostem masy wywoływanym przez Higgsa. Ale nie daje nam spokoju pytanie: dlaczego te masy - masa cząstek W^+ , W^- , Z^0 , kwarków u , d , c , s , t i b oraz leptonów - nie tworzą żadnego wyraźnego porządku? Masy te wynoszą od 0,0005 GeV w przypadku elektronu do ponad 91 GeV w przypadku kwarka t .¹ Należy przypomnieć, że ta dziwaczna koncepcja - pola Higgsa - została z wielkim powodzeniem zastosowana przy formułowaniu teorii oddziaływania elektroslabego. Wtedy zaproponowano Higgsa jako środek pozwalający na ukrycie jedności oddziaływania elektromagnetycznego i słabego. W stanie jedności istnieją cztery pozbawione masy cząstki - W^+ , W^- , Z^0 i foton - które przenoszą oddziaływanie elektroslabe.

¹ Najnowsze pomiary określają masę kwarka t na 180 GeV (przyj. red.).

Pojawia się pole Higgsa i - *presto!* - cząstki W oraz Z wsysają esencję Higgsa i robią się ciężkie. Foton pozostaje nie zmieniony. Oddziaływanie elektroślabe rozpada się na słabe (słabe, bo cząstki je przenoszące są tak ciężkie) i elektromagnetyczne, którego własności są określone przez pozbawiony masy foton. Symetria spontanicznie ulega złamaniu - mówią teoretycy. Ja wolę stwierdzenie, że Higgs ukrywa symetrię przez swą moc nadawania masy. Masy cząstek W i Z zostały dokładnie przewidziane przez teorię oddziaływania elektroślabe. A odprężone uśmiechy na twarzach teoretyków mówią nam, że 't Hooft i Veltman wykazali, iż cała ta teoria jest wolna od nieskończoności.

Zatrzymuję się tak długo nad problemem masy, bo towarzyszył mi on przez cały czas mojej pracy zawodowej. W latach czterdziestych zagadnienie zdawało się być dobrze określone. Mieliśmy dwie cząstki, które ilustrowały zagadkę masy. Elektron i mion wydawały się pod każdym względem takie same, z tym że mion jest dwieście razy cięższy od swego chuderławego kuzyna. Fakt, że są to leptony, które ignorują oddziaływanie silne, czynił całe zagadnienie jeszcze bardziej intrygującym. Problem ten nie dawał mi spokoju i mion został moim ulubionym obiektem badań. Chciałem znaleźć jakąś różnicę w zachowaniu mionów i elektronów, która mogłaby stanowić wskazówkę pozwalającą wyjaśnić różnicę ich mas.

Jądro czasem chwytła elektron, wskutek czego powstaje neutrino i wzbudzone jądro. Czy to samo może się przydarzyć mionowi? Badaliśmy proces wychwytywania mionów i proszę - to samo! Wysokoenergetyczna wiązka elektronów rozprasza się na protonach. (Tę reakcję badano na Uniwersytecie Stanforda). Przeprowadziliśmy tę samą reakcję w Brookhaven, używając mionów. Zanotowaliśmy niewielką różnicę, która zwozdiła nas przez lata, ale nic z tego nie wyniknęło. Odkryliśmy nawet, że elektron i mion mają oddzielnych partnerów - neutrina. Omawiałem już superprecyzyjny eksperyment „ g minus 2”, w którym zmierzony został moment magnetyczny mionu i porównany z momentem magnetycznym elektronu. Wyjąwszy efekt wynikający z różnicy masy, są one jednakowe.

Wszystkie wysiłki mające na celu znalezienie wskazówki wyjaśniającej pochodzenie masy spełzały na niczym. W pewnym momencie Feynman napisał swą słynną rozprawę *Dlaczego mion waży?* Teraz przynajmniej mamy częściową - w żadnym razie nie kompletną - odpowiedź. Słychać stentorowy głos: „To Higgs!” Przez pięćdziesiąt lat głowiliśmy się nad zagadką pochodzenia masy, a teraz pole Higgsa ukazuje nam problem w nowym świetle. Teraz już nie chodzi tylko o mion, Higgs stanowi wspólne źródło wszelkich mas. Nowe pytanie Feynmana mogłoby brzmieć: Jak pole Higgsa determinuje najwyraźniej pozbawioną porządku sekwencję mas nadawanych cząstkom materii?

Zmienność masy w zależności od rodzaju ruchu, zależność masy od konfiguracji układu oraz to, że niektóre cząstki - foton na pewno, przypuszczalnie także neutrino - mają zerową masę, wszystkie te czynniki razem wzięte podają w wątpliwość pojęcie masy jako fundamentalnej cechy materii. Musimy też przypomnieć sobie o problemach z obliczeniami, w których wychodziła nieskończona masa i których nigdy nie rozwiązaaliśmy, tylko pozbyliśmy się kłopotu poprzez renormalizację. Mając to wszystko na uwadze, stawiamy czoło problemowi kwarków, leptonów i nośników oddziaływania, które różnią się masami. W tej sytuacji hipoteza dotycząca Higgsa - że masa nie jest fundamentalną własnością cząstek, lecz nabytą poprzez oddziaływanie ze swym otoczeniem - daje się łatwiej obronić. Koncepcja mówiąca, że masa nie jest fundamentalną własnością materii, jak ładunek czy spin, staje się jeszcze bardziej wiarygodna w świetle idyllicznej wizji kwarków i leptonów zupełnie pozbawionych masy. W takiej sytuacji

wszystkie cząstki byłyby podporządkowane zadowalającej symetrii, symetrii chiralnej, w której spiny cząstek są niezmiennie związane z ich kierunkiem ruchu. Ale Higgs ukrywa tę idyllę.

Ach, jest jeszcze jedna sprawa. Mówiliśmy o bozonach cechowania i ich spinie równym jedności. Omawialiśmy także cząstki materii, zwane fermionami (spin równy $1/2$). Do której z tych grup należy zaliczyć Higgsa? Jest on bozonem o spinie równym zeru. Spin implikuje, że cząstka jest w jakiś sposób zorientowana w przestrzeni, ale pole Higgsa nadaje masę ciałom niezależnie od ich położenia, bez względu na kierunek. Z tego powodu nazywa się go czasem bozonem skalarnym.

Kryzys unitarności?

Choć bardzo nas intryguje ciekawa zdolność nadawania masy, którą przejawia to nowe pole, jeden z moich ulubionych teoretyków - Tini Veltman - twierdzi, że pełni ono jeszcze inną, znacznie ważniejszą rolę. Jest nią ni mniej, ni więcej tylko uratowanie modelu standardowego. Bez Higgsa model nie spełnia prostego kryterium wewnętrznej spójności.

Mam tu na myśli rzecz następującą. Mówiliśmy wiele o zderzeniach. Skierujmy sto cząstek na określoną tarczę, powiedzmy kawałek żelaza o powierzchni jednego centymetra kwadratowego. Nawet umiarkowanie zdolny teoretyk potrafi obliczyć prawdopodobieństwo (pamiętaj, drogi Czytelniku, że teoria kwantowa pozwala nam jedynie na określanie prawdopodobieństwa) rozproszenia. Teoria może na przykład przewidywać, że ze stu cząstek skierowanych na tarczę dziesięć ulegnie rozproszeniu, co daje prawdopodobieństwo równe 10 procent. Dalej, według wielu teorii, prawdopodobieństwo rozproszenia zależy od energii padających cząstek. Przy niskich energiach teorie wszystkich znanych oddziaływań - słabego, silnego i elektromagnetycznego - przewidują wielkości prawdopodobieństwa pozostające w zgodzie z wynikami eksperymentów. Jednak wiadomo, że w wypadku oddziaływania słabego prawdopodobieństwo rośnie ze wzrostem energii. Przy średniej energii prawdopodobieństwo rozproszenia może wzrosnąć do 40 procent. Jeśli z teorii wynika, że przekroczyło ono sto procent, jest to nieomylny znak, że przestaje być poprawna, bo prawdopodobieństwo nie może przyjmować takiej wartości. Wynik taki oznaczałoby, że odbiciu ulega więcej cząstek niż zostało wysłanych. Gdy zachodzi taka sytuacja, mówimy, że teoria łamie unitarność.

W naszej historii zagadkę stanowi to, że teoria oddziaływania słabego jest zgodna z danymi eksperymentalnymi przy niskich energiach, ale prowadzi do nonsensownych rezultatów przy wysokich. Kryzys ten odkryto w okresie, kiedy energia, przy której miała nastąpić katastrofa, pozostawała jeszcze poza zasięgiem możliwości istniejących akceleratorów. Niemniej niepowodzenie teorii wskazywało na to, że czegoś nie uwzględniono, jakiegoś nowego procesu - być może jakiejś nowej cząstki, która (gdybyśmy tylko wiedzieli, czym ona jest) zapobiegłaby wzrostowi prawdopodobieństwa do nonsensownych wielkości. Jak pamiętasz, drogi Czytelniku, Fermi wynalazł oddziaływanie słabe, aby opisać radioaktywny rozpad jądra. Rozpady takie są w zasadzie zjawiskami zachodzącymi przy niskich energiach. W miarę jak teoria Fermiego się rozwijała, coraz dokładniej opisywała ogromną liczbę procesów w zakresie energii bliskim 100 MeV. Jednym z powodów, dla których przeprowadziliśmy nasz dwuneutrinowy eksperyment, była chęć sprawdzenia teorii przy wyższych energiach, ponieważ przewidywano, że kryzys

ma wystąpić już przy 300 GeV. Nasz eksperyment przebiegający przy energii kilku GeV potwierdził, że teoria zmierzała ku kryzysowi. Wiązało się to z tym, że teoretycy nie uwzględnili cząstki W o masie bliskiej 100 GeV.

Pierwotna teoria Fermiego - bez cząstki W - z matematycznego punktu widzenia była równoważna używaniu nieskończenie ciężkiego nośnika oddziaływania. Sto GeV jest wielkością tak dużą (w porównaniu z energiami poniżej 100 MeV, dostępnymi we wcześniejszych eksperymentach), że tak sformułowana teoria działała zupełnie dobrze. Kiedy jednak zapragnęliśmy dowiedzieć się czegoś o zachowaniu neutrin o energii 100 GeV, musieliśmy włączyć do teorii cząstkę W o masie 100 GeV, aby uniknąć kryzysu unitarności. Lecz to jeszcze nie wystarczyło, by uratować teorię.

Mam nadzieję, iż ten krótki przegląd wykazał, że model standardowy cierpi na chorobę unitarnościową w jej najbardziej zjadliwej postaci. Obecnie do katastrofy dochodzi przy energii równej około 1 TeV. Obiektem, który mógłby pomóc jej uniknąć, gdyby... gdyby istniał, jest neutralna cząstka o szczególnych własnościach, którą nazywamy - tak, zgadłeś, drogi Czytelniku! - cząstką Higgsa. (Do tej pory mówiliśmy o polu Higgsa, ale należy pamiętać, że kwanty pola są cząstkami). Możliwe, że jest to ta sama cząstka, której zawdzięczamy różnorodność mas; możliwe, że tylko ją przypomina. Możliwe, że istnieje tylko jedna cząstka Higgsa; możliwe również, że cała ich rodzina...

Kryzys Higgsa

Mnóstwo pytań czeka na odpowiedź. Jakie własności mają cząstki Higgsa i, co ważniejsze, jakie masy? Jak je rozpoznać, jeśli napotkamy je w zderzeniu. W ilu odmianach występują. Czy dziełem Higgsa jest cała masa, czy tylko jej część. I w jaki sposób możemy dowiedzieć się o tym czegoś więcej? Ponieważ jest to Boska Cząstka, wystarczy poczekać i jeśli będziemy wieść przykładowe życie, dowiemy się wszystkiego, kiedy już znajdziemy się w Królestwie Niebieskim. Albo możemy wydać osiem miliardów dolarów i zbudować nadprzewodzący superakcelerator w Waxahachie w Teksasie, aby wyprodukował cząstkę Higgsa.

Kosmolodzy także ulegli fascynacji ideą Higgsa, gdy stwierdzili, że potrzebują pola skalarnego, które uczestniczyłoby w skomplikowanym procesie rozszerzania się Wszechświata. W ten sposób powiększyli, już i tak niemały, ciężar, który ta cząstka musi dźwigać. Szerzej pomówimy o tym w następnej części.

Obecnie uważa się, że pole Higgsa można zniszczyć za pomocą wysokiej energii (czyli temperatury). Powstają wtedy fluktuacje kwantowe, które neutralizują pole Higgsa. Mamy zatem wspólny cząstkowo-kosmologiczny obraz młodego Wszechświata - czystego i jaśniejącego olśniewającą symetrią - w którym jest zbyt gorąco dla Higgsa. Ale gdy temperatura/energia spada poniżej 10^{15} kelwinów lub 100 GeV, Higgs się uaktywnia i zaczyna wytwarzać masę. Zatem przed Higgsem mieliśmy pozbawione masy cząstki W , Z i fotony zjednoczone w oddziaływaniu elektroslabym. Wszechświat rozszerza się i stygnie, Higgs zaczyna działać, czyni cząstki W i Z tłustymi i z jakiegoś powodu ignoruje foton. W rezultacie symetria elektroslaba zostaje złamana. Otrzymujemy oddziaływanie słabe przenoszone przez masywne cząstki W^+ , W^- i Z^0 oraz, oddzielnie, oddziaływanie elektromagnetyczne przenoszone przez fotony. To tak, jakby dla pewnych cząstek pole Higgsa było gęstą mazią, w której jest im trudno się poruszać, i przez to wy-

dają się masywne; dla innych cząstek pole Higgsa jest jak woda, a jeszcze inne - fotony i, być może, neutrino - go nie wyczuwają.

Powinienem zapewne wreszcie wyjaśnić, skąd się wzięła koncepcja cząstki i pola Higgsa, nawet jeśli dotąd udało mi się uniknąć zdradzenia tej tajemnicy; nazywa się ją także ukrytą symetrią lub spontanicznym złamaniem symetrii. Do fizyki cząstek elementarnych idea ta została wprowadzona przez Petera Higgsa z Uniwersytetu w Edynburgu. Odwoływali się do niej teoretycy Steven Weinberg i Abdus Salam, niezależnie od siebie pracujący nad wyjaśnieniem, jak jednolite i symetryczne oddziaływanie elektro-słabe przenoszone przez szczęśliwą rodzinę czterech cząstek o zerowej masie uległo przemianie w dwa bardzo różne oddziaływania: QED z fotonem i oddziaływanie słabe z masywnymi cząstkami W^+ , W^- i Z^0 . Weinberg i Salam korzystali z wcześniejszych prac Sheldona Glashowa, który postępując śladami Juliana Schwingera po prostu wiedział, że istnieje spójna, jednolita teoria oddziaływania elektro-słabego, ale nie zebrał razem wszystkich koniecznych szczegółów. Były jeszcze prace Jeffrey Goldstone'a, Martinusa Veltmana i Gerarda 't Hoofta. Należałoby wspomnieć także o innych, ale... cóż, takie jest życie. Poza tym, ilu teoretyków potrzeba, żeby wkręcić żarówkę?

Można także patrzeć na Higgsa z punktu widzenia symetrii. W wysokich temperaturach symetria jest odsłonięta - królewska, czysta prostota. W niższych temperaturach ulega załamaniu. Pora na kolejne metafory.

Rozważmy magnes. Jest on magnesem dlatego, że w niskich temperaturach jego atomowe magnesyki są uporządkowane, dzięki czemu można w nim wyróżnić pewien szczególny kierunek: oś północ-południe. W ten sposób magnes stracił symetrię charakterystyczną dla kawałka niemagnetycznego żelaza, w którym wszystkie kierunki przestrzenne są równoważne. Możemy jednak „naprawić” magnes. Podnosząc temperaturę kawałka magnetycznego żelaza, otrzymujemy żelazo niemagnetyczne. Ciepło powoduje drgania molekularne, które w końcu niszczą stan uporządkowania, i otrzymujemy czystszy symetrię. Jeszcze inaczej można tę myśl przedstawić poprzez porównanie do meksykańskiego kapelusza - sombrero. Jest to symetryczna kopułka otoczona symetrycznym, wywiniętym do góry rondem. Na szczycie kopułki umieszczamy szklaną kulkę. Układ taki stanowi przykład doskonałej symetrii obrotowej, ale jest bardzo niestabilny. Gdy kulka stoczy się do bardziej stabilnego położenia (o niższej energii) gdzieś na rondzie, symetria ulega zniszczeniu, choć podstawowa struktura pozostaje symetryczna.

W jeszcze innej metaforze wyobrażamy sobie doskonałą kulę wypełnioną parą wodną o bardzo wysokiej temperaturze. Mamy układ o doskonałej symetrii. Jeśli go ochłodzimy, w końcu otrzymamy bajorko wody z pływającymi w nim kawałkami lodu i unoszącymi się nad powierzchnią resztkami pary. Symetria uległa całkowitemu zniszczeniu za sprawą zwykłego ochłodzenia, które pozwala polu grawitacyjnemu wywrzeć swój wpływ. Jednak można powrócić do stanu rajskiej symetrii - wystarczy podgrzać układ.

Tak więc przed Higgsem - symetria i nuda; po Higgsie - złożoność i bogactwo doznań. Gdy następnym razem spojrzysz, drogi Czytelniku, na usiane gwiazdami niebo, miej świadomość, że całą przestrzeń wypełnia tajemnicze działanie Higgsa, który jest odpowiedzialny, jak głosi teoria, za złożoność naszego kochanego świata.

Wyobraź sobie teraz, drogi Czytelniku, wzory matematyczne (a fe!), które poprawnie przewidują i opisują własności cząstek i oddziaływań, mierzone w Fermilabie i innych laboratoriach akceleratorowych w latach dziewięćdziesiątych. Te same wzory za-

stosowane do reakcji zachodzących przy wysokich energiach prowadzą do bzdurnych wyników. Jeśli jednak uwzględnimy pole Higgsa, zmodyfikujemy teorię i otrzymamy rozsądne wyniki nawet przy energiach sięgających 1 TeV. Higgs ratuje teorię, ratuje model standardowy z wszystkimi jego zaletami. Czy to dowodzi, że wszystko jest OK? Nie, wcale nie. Ale teoretyków nie stać na razie na nic więcej. Możliwe, że Bogini jest jeszcze sprytniejsza.

Dygresja o niczym

Fizycy z epoki Jamesa Clerka Maxwella czuli, że potrzebny jest wypełniający całą przestrzeń ośrodek, w którym mogłoby się przemieszczać światło i inne fale elektromagnetyczne. Nazwali ten ośrodek eterem i tak określili jego własności, aby mógł spełniać swoje zadanie. Eter stanowił także absolutny układ odniesienia, pozwalający na pomiar prędkości światła. Albert Einstein wykazał jednak, że eter to niepotrzebny ciężar nałożony na całą przestrzeń. Dotykamy tu doniosłego pojęcia pustki, wymyślonego (albo odkrytego) przez Demokryta. Dziś pustka, a dokładniej mówiąc „stan próżni”, odgrywa centralną rolę w naszych badaniach.

Na stan próżni składają się te rejony Wszechświata, gdzie nie ma żadnej materii ani energii, ani pędu. To jest „zupełnie nic”. James Bjorken, mówiąc o tym stanie, stwierdził kiedyś, że miał pokusę, by zrobić dla fizyki to, co John Cage zrobił dla muzyki: cztery minuty i dwadzieścia dwie sekundy... niczego. Tylko strach przed przewodniczącym konferencji odwiódł go od tego pomysłu. Choć Bjorken jest ekspertem w zakresie własności stanu próżni, to nie dorównuje 't Hooftowi, który o wiele lepiej zna się na zupełnie niczym.

Przygnębiającym aspektem całej tej sprawy jest to, że pierwotna doskonałość stanu próżni (jako pojęcia) została tak zanieczyszczona w XX wieku (niech no tylko Zieloni się o tym dowiedzą!) przez teoretyków, że teraz swym skomplikowaniem znacznie przewyższa dziewiętnastowieczny eter. Obecnie eter został zastąpiony przez pole Higgsa, którego wymiarów jeszcze nie znamy, oraz przez widmowe cząstki wirtualne. Aby pole mogło spełniać swoją rolę, musi istnieć (a eksperymenciści powinni ją znaleźć) przynajmniej jedna obojętna elektrycznie cząstka Higgsa. Możliwe, że będzie to tylko wierzchołek góry lodowej. Może się okazać, że potrzebujemy całej menażerii różnych bozonów Higgsa, aby dokładnie opisać nowy eter. Niewątpliwie występują tu nowe oddziaływania i nowe procesy. Całą naszą nikłą wiedzę na ten temat możemy następująco podsumować: przynajmniej niektóre z cząstek reprezentujących eter Higgsa muszą mieć zerowy spin, muszą bardzo blisko i w tajemniczy sposób wiązać się z masą oraz przejawiać się w temperaturach równoważnych energii mniejszej niż 1 TeV. Na temat budowy cząstki Higgsa także panują sprzeczne opinie. Przedstawiciele jednej ze szkół utrzymują, że jest cząstką elementarną, natomiast wyznawcy innej twierdzą, że składa się z nowych kwarkopodobnych obiektów, które w przyszłości odkryjemy eksperymentalnie. Innych intryguje duża masa kwarka t . Ci przypuszczają, że cząstka Higgsa jest stanem związanym kwarków t i $\text{anty-}t$. Tylko dane doświadczalne mogą to rozstrzygnąć. Doprawdy, to cud, że w ogóle widać gwiazdy.

A zatem nowy eter stanowi układ odniesienia dla energii, w tym wypadku energii potencjalnej. Sam Higgs nie wyjaśnia pochodzenia innych rupieci i teoretycznych śmieci, którymi zapchany jest stan próżni. Teorie cechowania formułują swoje wymagania,

kosmolodzy eksploatują energię „falszywej” próżni, a podczas ewolucji Wszechświata próżnia może się rozciągać i rozszerzać.

Ogarnia człowieka tęsknota za nowym Einsteinem, który w błysku intuicji zwróci nam naszą uroczą nicość.

Znaleźć Higgsa

A zatem Higgs jest wspaniały. Dlaczego więc nie zaakceptowano go powszechnie? Peter Higgs, który (bardzo niechętnie) użył swego nazwiska tej koncepcji, pracuje nad innymi zagadnieniami. Tini Veltman, jeden z twórców pola Higgsa, nazwał je dywanikiem, pod który wmiatamy naszą ignorancję. Sheldon Glashow jest mniej subtelny i nazwał je toaletą, w której splukujemy braki obecnych teorii. Poza tym nie dysponujemy nawet cieniem danych doświadczalnych na poparcie koncepcji Higgsa.

W jaki sposób można udowodnić istnienie tego pola? Pole Higgsa, podobnie jak QED, QCD czy oddziaływanie słabe, ma swoją własną cząstkę - bozon Higgsa. Jak wykazać, że on istnieje? Wystarczy znaleźć cząstkę. Model standardowy jest wystarczająco potężny, by nam powiedzieć, że najlżejsza cząstka Higgsa (może ich być wiele) musi „ważyć” mniej niż 1 TeV. Dlaczego? Bo jeśli waży więcej niż 1 TeV, model standardowy staje się znów niespójny i mamy kryzys unitarności.

Pole Higgsa, model standardowy i nasze wyobrażenie o tym, jak Bóg stwarzał Wszechświat, zależą od tego, czy znajdziemy bozon Higgsa. Niestety, nie ma na Ziemi akceleratora, który dysponowałby energią zdolną stworzyć tak ciężką cząstkę.

Możemy wszakże taki zbudować.

Pustyniatron

W roku 1981 byliśmy bardzo zaangażowani w budowę tawatronu oraz akceleratora zderzającego wiązki protonów i antyprotonów. Oczywiście, zwracaliśmy nieco uwagi na to, co się dzieło na świecie, a zwłaszcza na trwające w CERN poszukiwania cząstki *W*. Nim minął rok, przekonaliśmy się, że magnesy nadprzewodzące będą działać jak należy i że możliwa jest ich seryjna produkcja. Mieliśmy pewność przynajmniej na 90 procent, że przy stosunkowo umiarkowanych wydatkach potrafimy zbliżyć się do *terra incognita* fizyki cząstek elementarnych: energii 1 TeV.

Dlatego zaczęliśmy myśleć o „następnej maszynie” (następnej po tawatronie) - jeszcze większym pierścieniu wyposażonym w magnesy nadprzewodzące. Ale w roku 1981 przyszłość badań w dziedzinie fizyki cząstek elementarnych zależała od maszyny walczącej o przetrwanie w laboratorium w Brookhaven. Chodzi o projekt Isabelle - akcelerator protonów o umiarkowanej energii, który powinien był zacząć działać już w roku 1980, ale problemy techniczne spowodowały opóźnienie jego uruchomienia. A tymczasem linia frontu badań fizycznych przesunęła się znacznie.

Podczas dorocznego spotkania użytkowników Fermilabu w maju 1981 roku złożyłem stosowny raport o stanie laboratorium i pozwoliłem sobie na wypowiedź dotyczącą przyszłości naszej dziedziny, a zwłaszcza sprawy „obszaru energii około 1 TeV”. Zaznaczyłem, że Carlo Rubbia, postać już i tak dominująca w CERN, wkrótce „wybrukuje tunel LEP magnesami nadprzewodzącymi”. Pierścień LEP o obwodzie około 27 kilome-

trów, w którym zderzane są elektrony i pozytony, zawierał zwykłe magnesy. LEP musiał mieć tak duży promień, by minimalizować straty energii przyspieszanych elektronów, które ją wypromieniowują, gdy są uwięzione na kołowej orbicie. (Pamiętaj, drogi Czytelniku, że im mniejszy promień, tym więcej promieniowania). Toteż LEP wykorzystywał niewielkie pole magnetyczne i duży promień. Dzięki temu nadawał się też świetnie do przyspieszania protonów, które mając większą masę, wypromieniowują niewiele energii. Dalekowzroczni projektanci niewątpliwie planowali, że takie będzie ostateczne zastosowanie wielkiego tunelu LEP. Maszyna wyposażona w magnesy nadprzewodzące mogłaby z powodzeniem osiągnąć energię bliską 5 TeV w każdym pierścieniu, czyli 10 TeV w zderzeniu. Stany Zjednoczone przystępowały do współzawodnictwa z tewa-tronem o mocy 2 TeV i rozsypującą się Isabelle - akceleratorem o mocy 400 GeV (czyli w sumie 0,8 TeV), którego zaletą była duża liczba zderzeń.

Latem 1982 roku wyglądało na to, że zarówno realizowany w Fermilabie program wprowadzania magnesów nadprzewodzących, jak i budowany w CERN akcelerator protonów i antyprotonów będą działać jak należy. Gdy w sierpniu amerykańscy fizycy zajmujący się procesami wysokoenergetycznymi spotkali się w Snowmass w Kolorado, aby omówić przyszłość naszej dziedziny, wykonałem swój ruch. W referacie zatytułowanym *Maszyna-na-pustyni* zaproponowałem, aby poważnie rozpatrzone nadanie najwyższego priorytetu budowie nowego, ogromnego akceleratora, który miałby korzystać z „wypróbowanej” technologii supermagnesów i który pozwoliłby nam wkroczyć do obszaru 1 TeV. Przypomnijmy, że aby stworzyć cząstkę o masie 1 TeV, kwarki uczestniczące w zderzeniu powinny wnieść co najmniej taką właśnie ilość energii. Protony składające się z kwarków i gluonów muszą mieć znacznie więcej energii. W roku 1982 oceniłem jej ilość na około 10 TeV w każdej z wiązek. Sporządziłem przybliżony kosztorys całego przedsięwzięcia i zakończyłem swą przemowę, wyrażając nadzieję, że pokusa znalezienia Higgsa jest zbyt wielka, by ją zignorować.

Potem odbyła się umiarkowana ożywiona dyskusja nad planem budowy - jak go początkowo nazywano - pustyniatronu. Nazwa wzięła się stąd, że zakładaliśmy, iż tak wielką maszynę można wznieść jedynie w miejscu pustynnym, gdzie nie ma ludzi, wzgórz i dolin. To było błędne założenie. Jak to się stało, że ja, nowojorczyk wychowany w kolejce podziemnej, mogłem zapomnieć o rozwoju sztuki kopania głębokich tuneli? Wokół mieliśmy mnóstwo przykładów. Niemiecka maszyna HERA znajduje się pod gęsto zaludnionym Hamburgiem, a LEP przedziera się przez Góry Jurajskie.

Usiłowałem stworzyć wspólną koalicję wszystkich ośrodków dla poparcia idei budowy nowego urządzenia. SLAC zawsze zajmował się przyspieszaniem elektronów. Brookhaven walczyło, by utrzymać Isabelle przy życiu, a żwawa i bardzo utalentowana grupa z Cornell próbowała unowocześnić swoją maszynę i doprowadzić ją do stanu, który nazwano CESR II. Nazwałem więc laboratorium przy pustyniatronie Slermihaven II, by podkreślić konieczność współpracy i zgodnego poparcia dla nowego przedsięwzięcia ze strony wszystkich laboratoriów, które zwykle zaciekle ze sobą współzawodniczą.

Nie będę się rozwodził nad polityczną stroną nauki, ale wreszcie po roku pełnym ciężkich przejść ogół fizyków cząstek elementarnych formalnie poparł porzucenie Isabelle, której zmieniono nazwę na CBA (od Colliding Beam Accelerator, czyli akcelerator zderzających się wiązek), na rzecz pustyniatronu, który obecnie nazywa się nadprzewodzącym superakceleratorem (SSC). Planowaliśmy, że każda wiązka w SSC poniesie energię 20 TeV. Jednocześnie - w lipcu 1983 - nowy akcelerator pracujący w Fermila-

bie dostał się na pierwsze strony gazet, ponieważ zaczął przyspieszać protony do rekordowej energii 512 GeV. Po tym nadeszły inne sukcesy, a mniej więcej rok później tevatron osiągnął 900 GeV.

Prezydent Reagan i superakcelerator: prawdziwa historia

W roku 1986 projekt SSC był już gotowy do przedłożenia prezydentowi Reaganowi. Ponieważ pełniłem wówczas funkcję dyrektora Fermilabu, sekretarz Departamentu Energii poprosił mnie o przygotowanie krótkiego filmu dla prezydenta. Uważałem, że dobrze by było pokazać taki dziesięciominutowy program prezentujący problemy, którymi zajmuje się fizyka wysokich energii, w czasie dyskusji nad projektem. Jak nauczyć prezydenta fizyki cząstek elementarnych w ciągu dziesięciu minut? A co gorsza: jak nauczyć tego prezydenta? Przez dłuższy czas łamaliśmy sobie głowy, aż wreszcie wpadliśmy na pomysł, by zaprosić młodzież z pobliskiej szkoły średniej i oprowadzić ją po laboratorium. Młodzież miała zadawać pytania, a my udzielalibyśmy możliwie przystępnych odpowiedzi. Prezydent obejrzałby to wszystko i może wyrobiłby sobie jakiś pogląd na fizykę wysokich energii. Zaprosiliśmy więc uczniów, udzieliliśmy im paru wskazówek i puściliśmy resztę na żywioł. Nakręciliśmy trzydzieści minut, z których po cięciach zostało nam czternaście. Nasz łącznik z Waszyngtonem ostrzegł nas: nie może być więcej niż dziesięć minut. Wspominał coś o zdolności koncentracji uwagi. Wycięliśmy więc jeszcze trochę i posłaliśmy dziesięć minut klarownej fizyki cząstek elementarnych na poziomie drugiej klasy licealnej. Po kilku dniach przekazano nam opinię: „Nie nadaje się, zbyt skomplikowane”.

Co zrobić? Przerobiliśmy ścieżkę dźwiękową, wyrzuciliśmy pytania uczniów. Niektóre z nich były w końcu dość trudne. Nagraliśmy głos eksperta referującego pytania (napisane przeze mnie), które młodzi ludzie mogliby zadać oraz nasze odpowiedzi, nie zmieniając akcji: naukowcy gestykują, młodzież się gapi. Tym razem narracja była jasna jak słońce i bardzo prosta. Wypróbowaliśmy całość na nie-technicznych pracownikach i wysłaliśmy. Nasz facet z Departamentu Energii już się niecierpliwił.

Znów był niezadowolony: „No cóż, lepiej, ale wciąż jeszcze zbyt skomplikowane”.

Zacząłem się denerwować. Chodziło już nie tylko o los nadprzewodzącego superakceleratora, ale i o moją posadę. Tej nocy obudziłem się o trzeciej nad ranem z gotowym genialnym pomysłem. Następny film będzie wyglądał następująco: Do wejścia do laboratorium podjeżdża mercedes, wysiada z niego dostoyny dżentelmen w wieku około 55 lat. Słychać głos: „Oto sędzia Sylvester Matthews z czternastego Federalnego Okręgu Sądowego zwiedza wielkie rządowe laboratorium naukowe”. Sędzia wyjaśnia swym gospodarzom - trojgu sympatycznym, młodym fizykom - że niedawno osiedlił się w tej okolicy i że mija laboratorium każdego dnia po drodze do sądu. Czytał o naszej pracy w „Chicago Tribune” i wie, że zajmujemy się tu voltami i atomami. Ponieważ nigdy nie studiował fizyki, chciałby się dowiedzieć, co się tu dzieje. Wkracza do budynku, uprzejmie dziękując fizykom, że zechcieli mu poświęcić nieco swego cennego czasu.

Chodziło mi o to, że prezydent będzie mógł utożsamić się z inteligentnym laikiem, który ma dość pewności siebie, by przyznać, że czegoś nie rozumie. W ciągu następnych ośmiu i pół minut filmu sędzia często przerywa fizykom i nalega, by trochę zwolnili i jeszcze raz wyjaśnili to czy tamto zagadnienie. W dziewiątej minucie sędzia spogląda na swój rolex i z wdziękiem dziękuje młodym naukowcom. Z nieśmiałym uśmiechem

dodaje: „Wiecie państwo, prawdę mówiąc, nie rozumiałem większości z tego, co mówiliście, ale dostrzegłem wasz entuzjazm i wielkość waszej misji. Tak musiał wyglądać podbój Dzikiego Zachodu... samotny jeździec, a wokół niego rozległy niezbadany ląd...” (Tak, to ja napisałem te słowa).

Kiedy film dotarł do Waszyngtonu, sekretarz wpadł w ekstazę: „Udało się, jest fantastyczny. Pokażemy go podczas *weekendu* w Camp David”.

Z wielką ulgą i uśmiechem na twarzy poszedłem spać, ale obudziłem się o czwartej nad ranem zlanym zimnym potem. Coś było nie tak. I nagle zrozumiałem! Nie powiedziałem sekretarzowi, że rolę sędziego odegrał aktor wynajęty z chicagowskiego biura pośrednictwa pracy. W tym właśnie okresie prezydent miał kłopoty ze znalezieniem odpowiedniego kandydata do Sądu Najwyższego. Przypuśćmy, że... wierciłem się i pociełem w pościeli, czekając, aż w Waszyngtonie wybije ósma. Za trzecim razem udało mi się wreszcie połączyć z sekretarzem.

- Słuchaj, ja w sprawie tego filmu...

- Mówiłem ci, że jest świetny.

- Ale muszę ci coś powiedzieć...

- Jest dobry, nie martw się, jest już w drodze do Camp David.

- Czekaj! - wrzasnąłem. - Ten sędzia! To nie jest prawdziwy sędzia, tylko aktor. Przypuśćmy, że prezydent zechce się z nim spotkać, porozmawiać, wygląda przecież tak inteligentnie. Przypuśćmy, że... [długa pauza].

- Sąd Najwyższy?

- Taak.

[Cisza, a potem parsknięcie].

- Słuchaj, jeśli powiem prezydentowi, że to aktor, z pewnością nominuje go do Sądu Najwyższego.

Niedługo potem prezydent zaaprobował budowę superakceleratora. Według felietonisty Georga Willa, dyskusja nad projektem była krótka. Prezydent wysłuchał swoich sekretarzy, których opinie w tej sprawie były mniej więcej równo podzielone: tyle samo za, co przeciw. Potem zacytował ulubionego gracza baseballowego: „Rzuć głęboko”. Wszyscy założyli, że miało to oznaczać: „Zróbmy to”. Tak oto nadprzewodzący superakcelerator stał się częścią narodowego planu.

W ciągu następnego roku w całych Stanach Zjednoczonych i Kanadzie trwały gorączkowe poszukiwania miejsca pod budowę akceleratora. W tym projekcie było coś podniecającego. Jakież inne urządzenie mogłoby sprawić, by burmistrz miasteczka Waxahachie w Teksasie stanął przed ludźmi i zakończył ognistą przemowę słowami: „I naród nasz jako pierwszy musi znaleźć skalarny bozon Higgsa”. Superakcelerator pojawił się nawet w drugoplanowym wątku w serialu *Dallas* - J. R. Ewing i inni próbowali w filmie wykupić tereny przylegające do miejsca, gdzie ma zostać wybudowany.

Kiedy podczas spotkania Narodowej Konferencji Gubernatorów, w jednym z kilku milionów moich wystąpień, w których promowałem ideę budowy SSC, wspominałem o wypowiedzi burmistrza, przerwał mi gubernator Teksasu. Zwrócił mi uwagę, że nieprawidłowo wymawiam nazwę Waxahachie. Najwyraźniej odchyliłem się od normy o więcej niż zwykłą różnicę między nowojorkczykiem a mieszkańcem Teksasu. Nie mogłem się powstrzymać: „Naprawdę się starałem, panie gubernatorze - zapewniłem go. - Pojechałem tam, wstąpiłem do restauracji i poprosiłem kelnerkę, by mi wyraźnie powiedziała, gdzie jestem. Powiedziała: B-U-R-G-E-R K-I-N-G”. Większość gubernatorów się roześmiała, ale nie gubernator Teksasu.

Rok 1987 był potrójnie superrokiem. Po pierwsze, zaobserwowano wtedy supernową, która rozbłysła w Wielkim Obłoku Magellana około 160 tysięcy lat temu. Jej sygnał dotarł wreszcie do naszej planety. Przy tej okazji po raz pierwszy zaobserwowano neutrina pochodzące spoza Układu Słonecznego. Później przyszło odkrycie zjawiska nadprzewodnictwa¹ w wysokich temperaturach, które wywołało w świecie wielkie poruszenie ze względu na możliwe zastosowania techniczne. Przez jakiś czas wyrażano nawet nadzieję, że wkrótce pojawią się nadprzewodniki działające w temperaturze pokojowej. Wyobrażano sobie, że zmniejszy się koszt przekazywania elektryczności, pojawią się lewitujące pociągi i mnóstwo innych cudów techniki, a na budowę SSC potrzeba będzie znacznie mniej pieniędzy. Teraz już wiemy, że były to nazbyt optymistyczne wizje. W roku 1993 wciąż prowadzi się intensywne badania nad nadprzewodnictwem w wysokich temperaturach i nad własnościami materiałów, ale daleka jest jeszcze droga do praktycznych i komercyjnych zastosowań.

Trzecie „super” dotyczyło poszukiwań miejsca pod budowę superakceleratora. Jednym z kandydatów był Fermilab, przede wszystkim z tego powodu, że tawatron mógłby posłużyć do wstrzykiwania protonów do głównego pierścienia nowego urządzenia: owalnego toru o obwodzie równym 86,5 kilometra. Po długich rozważaniach wyznaczony przez Departament Energii komitet wybrał Waxahachie. Ogłoszono tę decyzję w październiku 1988 roku, kilka tygodni po wielkim zebraniu, na którym raczyłem załogę żartami na temat świeżo otrzymanej Nagrody Nobla. Teraz odbyliśmy zupełnie inne zebranie. Przygnębieni pracownicy zgromadzili się, by zastanawiać się nad przyszłością Fermilabu.

W roku 1993 SSC jest już w budowie.² Przymuszczalna data zakończenia jej to rok 2000, plus minus dwa lata. Fermilab z zapałem unowocześnia swe urządzenie, aby poprzez zwiększenie liczby zderzeń zwiększyć szanse zarejestrowania kwarka t oraz zbadać dolne rejony tej wielkiej góry, na którą ma się wspiać SSC.

Oczywiście, Europejczycy tymczasem nie próżnują. Po okresie ożywionych debat, badań, próbnych projektów i posiedzeń komitetów, Carlo Rubbia, dyrektor naczelny CERN, postanowił wybrukować tunel LEP nadprzewodzącymi magnesami. Przypomnij sobie, drogi Czytelniku, że energia akceleratora zależy od wielkości pierścienia i mocy magnesów. Ponieważ obwód jest określony i ma 27 kilometrów, projektanci musieli się natrudzić, by osiągnąć najwyższe natężenie pola magnetycznego, jakie tylko jest do pomyslenia przy dostępnych technologiach, czyli 10 tesli. Jest to pole o 60 procent silniejsze niż projektowane dla SSC i 2,5 razy silniejsze niż w magnesach tawatronu. Aby sprostać temu wielkiemu wyzwaniu, będą musieli wspiać się na nowy poziom wyrafinowanej technologii nadprzewodników. Jeśli to się powiedzie, planowane urządzenie osiągnie energię 17 TeV (wobec 40 TeV planowanych dla SSC).

Budowa obu tych maszyn - jeśli rzeczywiście zostanie zakończona - będzie stanowiła ogromną inwestycję zarówno finansowych, jak i ludzkich zasobów. Toczy się gra o wielkie stawki. Co będzie, jeśli koncepcja Higgsa okaże się błędna? Jeśli nawet tak się stanie, pragnienie zbadania zjawisk w okolicach 1 TeV jest bardzo silne. Nasz model standardowy musi znaleźć potwierdzenie albo trzeba będzie go odrzucić. To jest tak, jak

¹ Ang. *superconductivity* (przyp. tłum.).

² Po wstrzymaniu budowy (patrz: przypis) fizycy wiążą nadzieje z projektem budowy LHC (Large Hadron Collider) w CERN. Akcelerator ten będzie wprawdzie osiągał energie mniejsze niż planowano dla SSC, ale wystarczające, by odkryć Higgsa (przyp. red.).

z Kolumbem wyruszającym na poszukiwanie Indii. „Nawet jeśli do nich nie dołynie - uważali prawdziwi sojusznicy - znajdzie coś innego, może nawet jeszcze ciekawszego”.

13. Mikroprzestrzeń, makroprzestrzeń i czas przed początkiem czasu

*Idziesz sobie Piccadilly
Z kwiatem maku albo lili
W średniowiecznej dłoni -
I każdy to powie,
Gdy tak idziesz mistycznie,
Jeśli ten młodzieniec wyraża się
W słowach zbyt głębokich dla mnie,
Och, jakże głębokim młodzieńcem
Ten głęboki młodzieniec być musi.
GILBERT I SULLIVAN, *Patience**

W swej *Obronie poezji* poeta angielski okresu romantyzmu, Percy Bysshe Shelley, twierdził, że jednym z najświętszych zadań artysty jest „przyswajanie nowej wiedzy naukowej i przybliżanie jej ludzkim potrzebom, zabarwianie jej ludzkimi namiętnościami, przetwarzanie na ciało i krew ludzkiej natury”.

Niewielu poetów romantycznych pośpieszyło, by realizować przesłanie Shelleya, dlatego dziś nasz naród i nasza planeta znajdują się w tak opłakany stan. Gdyby tak Byron, Keats i Shelley oraz inni poeci piszący po francusku, włosku i w języku urdu zajęli się propagowaniem wiedzy naukowej, jej znajomość wśród społeczeństwa byłaby znacznie lepsza. To, oczywiście, nie dotyczy Ciebie - już nie „drogi Czytelniku”, lecz Przyjacielu i Kolego - który przedarłeś się wraz ze mną aż do ostatniej części tego wykładu. Niniejszym nadajemy Ci królewskim dekretem tytuł w pełni wykształconego i wykwalifikowanego Czytelnika.

Ludzie, którzy zajmują się zagadnieniem upowszechniania wiedzy, zapewniają nas, że tylko jedna osoba na trzy potrafi określić, co to jest cząsteczka, albo podać nazwisko choćby jednego współczesnego uczonego. Do tej katastrofalnej statystyki dorzucam jeszcze: „A czy wiesz, że tylko 60 procent mieszkańców Liverpoolu ma pojęcie o nieabelowej teorii z cechowaniem?” Podczas uroczystości rozdania dyplomów w 1987 roku zapytano 23 losowo wybranych absolwentów Harvardu, czy wiedzą, dlaczego latem jest cieplej niż zimą. Tylko dwoje potrafiło udzielić poprawnej odpowiedzi. Przy okazji: nie chodzi o to, że w lecie Ziemia znajduje się bliżej Słońca niż w zimie. Nie znajduje się bliżej. Chodzi o to, że oś obrotu Ziemi jest nachylona, dlatego kiedy północna półkula zwraca się ku Słońcu, kąt padania promieni słonecznych na powierzchnię naszej planety jest bliższy kątowni prostemu i ta połowa globu cieszy się latem. Na drugą połowę promienie padają wówczas bardziej skośnie i tam panuje zima. Po sześciu miesiącach sytuacja się odwraca.

W ignorancji absolwentów Harvardu - Harvardu, na Boga! - najsmutniejsze jest to, że tak wiele tracą. Idą przez życie, nie rozumiejąc zjawiska pór roku. Oczywiście zdarzają się także chwile przyjemnego zaskoczenia. Kilka lat temu w kolejce podziemnej na Manhattanie siedział starszy pan i biedził się nad prostym równaniem całkowym. Zdesperowany zwrócił się do siedzącego obok nieznanego pasażera z prośbą o pomoc.

Ten skinął głową i szybko rozwiązał równanie. Oczywiście, nie co dzień się zdarza, by starszy człowiek uczył się rozwiązywania równań, siedząc w metrze obok Noblisty, fizyka teoretyka - T. D. Lee.

Ja także przeżyłem w pociągu podobne doświadczenie, ale z nieco innym zakończeniem. Siedziałem w zatłoczonej kolejce podmiejskiej wyjeżdżającej z Chicago, gdy wsiadła do niego pielęgniarka z grupą pacjentów z miejscowego szpitala psychiatrycznego. Ustawili się wokół mnie, a pielęgniarka zaczęła liczyć. „Raz, dwa, trzy... - popatrz na mnie. - A ty kim jesteś?”

„Nazywam się Leon Lederman - odpowiedziałem. - Jestem laureatem Nagrody Nobla i dyrektorem Fermilabu”.

Wskazała na mnie i ze smutną miną kontynuowała: „Dobrze, cztery, pięć, sześć...”

Ale, mówiąc poważnie, niepokój z powodu analfabetyzmu w dziedzinie nauk ścisłych jest w pełni uzasadniony. Między innymi dlatego, że związek między nauką, techniką i życiem codziennym staje się coraz ściślejszy. Poza tym bardzo szkoda, że tak wielu ludziom obcy jest obraz świata, który starałem się przedstawić w tym wykładzie. Choć obrazowi temu wciąż wiele brakuje do kompletności, jest w nim wielkość, piękno i zaczynająca się ujawniać prostota. Jak mówił Jacob Bronowski:

„Postęp w nauce polega na odkrywaniu na każdym kroku nowego porządku, który jednoczy to, co od dawna wydawało się różne. Faraday dokonał tego, gdy znalazł związek między elektrycznością i magnetyzmem. Clerk Maxwell skojarzył te dwie siły ze światłem. Einstein połączył czas z przestrzenią, masę z energią i drogę światła mijającego Słońce z torem pocisku. Swe ostatnie lata spędził na próbach dodania do tych podobieństw kolejnego, które miało odsonić jeden, wspólny porządek leżący u podstaw równań Maxwella i jego własnej geometrii grawitacji.

Gdy Coleridge próbował zdefiniować piękno, zawsze przywoływał tę samą głęboką myśl: piękno, mówił, to »jedność w różnorodności«. Nauka nie jest niczym innym, jak próbą odkrycia jedności ukrytej w różnorodności przyrody, a dokładniej mówiąc - w różnorodności naszych doświadczeń”.

Mikroprzestrzeń/makroprzestrzeń

By ujrzeć ten gmach we właściwym kontekście, uczynimy teraz małą wycieczkę w dziedzinę astrofizyki. Muszę wyjaśnić, dlaczego w ostatnich latach fizyka cząstek elementarnych i astrofizyka złączyły się ze sobą, osiągając nowy poziom zażyłości, który kiedyś nazwałem związkiem mikroprzestrzeni z makroprzestrzenią.

Podczas gdy fachowcy od mikroprzestrzeni budowali coraz potężniejsze mikroskopy-akceleratory, by zajrzeć w głąb subnuklearnych struktur, nasi koledzy zajmujący się makroprzestrzenią opracowywali dane uzyskiwane dzięki coraz większym teleskopom, wyposażonym w najnowsze osiągnięcia techniki, pozwalające zwiększać ich czułość i zdolność rejestrowania drobnych szczegółów ciał niebieskich. Kolejny przełom dokonał się wtedy, gdy w przestrzeni kosmicznej umieszczono obserwatoria wyposażone w instrumenty zdolne do wykrywania promieni podczerwonych, ultrafioletowych, rentgenowskich i gamma; krótko mówiąc, całego zakresu widma elektromagnetycznego, pochłanianego w znacznej części przez naszą nie do końca przezroczystą, kotłującą się atmosferę.

Syntezę ostatnich 150 lat rozwoju i osiągnięć kosmologii stanowi „kosmologiczny model standardowy”. Głosi on, że Wszechświat narodził się około 15 miliardów lat temu jako gorący gęsty, ściśnięty „pierwotny atom”. Wszechświat był wówczas nieskończenie lub prawie nieskończenie gęsty i nieskończenie lub prawie nieskończenie gorący. Fizycy nie czują się najlepiej, zapoznając się z tym opisem naszpikowanym nieskończonościami; wszystkie zastrzeżenia mają swe źródło w nie rozpoznanym do końca wpływie teorii kwantowej. Z powodów, których, być może, nigdy nie poznamy, Wszechświat kiedyś eksplodował i od tego momentu nieprzerwanie rozszerza się i stygnie.

Jak, u licha, kosmolodzy mogli do tego dojść? Model Wielkiego Wybuchu pojawił się w latach trzydziestych na skutek odkrycia, że wszystkie galaktyki - zbiorowiska około stu miliardów gwiazd - oddalają się od pewnego pana, który nazywa się Edwin Hubble, a który w roku 1929 zajmował się pomiarami ich prędkości. Hubble musiał zebrać dostateczną ilość światła z odległych galaktyk, aby rozszczepić je na linie widmowe, które mógłby porównać z liniami pierwiastków znajdujących się na Ziemi. Zauważył, że wszystkie linie są przesunięte w stronę czerwonego krańca widma. W taki właśnie sposób zachowuje się światło pochodzące ze źródła oddalającego się od obserwatora. Przesunięcie ku czerwieni jest miarą prędkości ruchu źródła względem obserwatora. Po latach pomiarów Hubble stwierdził, że wszystkie galaktyki oddalają się od niego we wszystkich kierunkach. Hubble kapał się regularnie i nie mógł tej ucieczki traktować jako demonstracji niechęci, z jaką galaktyki odnoszą się do niego. Uznał to za przejaw rozszerzania się przestrzeni. Ponieważ rozszerza się cała przestrzeń, astronom Hedwina Knubble, prowadząca swe obserwacje na planecie Twilo w Wielkiej Mgławicy Andromedy, dostrzegłaby to samo zjawisko: galaktyki oddalają się od niej. Co więcej, im bardziej odległy jest obiekt, tym szybciej się porusza. Na tym polega istota prawa Hubble'a. Wynika z niego, że gdybyśmy odwrócili bieg wydarzeń, najodleglejsze galaktyki - najszybciej się poruszające - zbliżyłyby się do mniej odległych ciał i w końcu wszystko razem stłoczyłoby się i zlało w małej, bardzo małej objętości w chwili, która według obecnych ocen nastąpiła około 15 miliardów lat temu.

W jednej ze słynniejszych metafor stosowanych w nauce proponuje się, byś wyobraził sobie, że jesteś dwuwymiarowym stworem - Płaszczakiem; znasz kierunki wschód-zachód i północ-południe, ale kierunek góra-dół dla Ciebie nie istnieje. Spróbuj usunąć kierunek góra-dół ze swojego doświadczenia. Żyjesz na rozszerzającym się balonie. Na całej jego powierzchni znajdują się skupiska obserwatorów - planety i gwiazdy połączone w galaktyki rozsiane są na powierzchni kuli. Wszystko to jest dwuwymiarowe. Niezależnie od miejsca, z którego prowadzi się obserwacje, widać, że wszystkie punkty nieustannie się od siebie oddalają, a powierzchnia stale rośnie. Zwiększa się odległość między każdymi dwoma punktami. Tak też jest z naszym trójwymiarowym Wszechświatem. Inną zaletą tej metafory jest to, że uzmysławia, iż w tym płaskim świecie, podobnie jak w naszym, nie ma żadnego wyróżnionego miejsca. Dowolny punkt na powierzchni balonu jest w demokratyczny sposób równoważny każdemu innemu. Żadnego środka. Żadnego brzegu. Nie ma niebezpieczeństwa spadnięcia z krawędzi. Ponieważ znamy jedynie nasz rozszerzający się Wszechświat (powierzchnia balonu), nie może być mowy o gwiazdach uciekających w przestrzeń. To sama przestrzeń rozszerzając się niesie z sobą cały ten majdan. Trudno jest wyobrazić sobie ekspansję zachodzącą wszędzie we Wszechświecie, bez żadnego wnętrza i zewnątrz. Istnieje tylko rozszerzający się Wszechświat. Gdzie albo dokąd się rozszerza? Pomyśl znowu o ży-

ciu Płaszczaka na powierzchni balonu. W naszej metaforze ta powierzchnia jest wszystkim, co istnieje.

Dwa główne wnioski wynikające z teorii Wielkiego Wybuchu zdołały wreszcie ostatecznie przekonać niemal wszystkich jej przeciwników; obecnie jest już powszechnie akceptowana. Pierwszy z nich stwierdza, że światło z początkowego rozbłysku - założywszy, że był on bardzo, bardzo gorący - wciąż jeszcze istnieje w świecie w postaci promieniowania relikтового. Przypomnij sobie, że światło składa się z fotonów, a energia fotonu jest odwrotnie proporcjonalna do długości jego fali. Ponieważ Wszechświat się rozszerza, rozciągnęły się długości wszystkich fal. Dlatego też przewidziano, że długości fal - pierwotnie nieskończenie małe, jak przystało na bardzo energetyczne fotony - rozrosły się aż do długości odpowiadających mikrofalom (kilka milimetrów). W roku 1965 odkryto gasnący żar Wielkiego Wybuchu - mikrofalowe promieniowanie tła. Cały Wszechświat tonie w tych falach poruszających się we wszystkich możliwych kierunkach. Fotony, które rozpoczęły podróż miliardy lat temu, gdy Wszechświat był znacznie mniejszy i gorętszy, wylądowały na antenach laboratorium Bell Telephone w stanie New Jersey. Co za los!

Po tym odkryciu trzeba było zmierzyć rozkład długości fal (w tym miejscu, w razie potrzeby, proszę sobie powtórnie przeczytać rozdział piąty niniejszej książki odwróconej do góry nogami), co w końcu zrobiono. Posługując się równaniem Plancka, można odczytać z tego rozkładu średnią temperaturę wszystkiego (przestrzeni, gwiazd, pyłu, a nawet zagubionego satelity), co jest skąpane w tych fotonach. Według najnowszych pomiarów, dokonanych przez NASA za pomocą satelity *COBE*, temperatura ta wynosi 2,73 stopnia powyżej zera absolutnego (2,73 K). Mikrofalowe promieniowanie tła jest także mocnym argumentem na rzecz teorii gorącego Wielkiego Wybuchu.

Skoro tak wyliczamy sukcesy, powinniśmy także wspomnieć o trudnościach, które wcześniej lub później zostały przezwyciężone. Astrofizycy badali promieniowanie mikrofalowe bardzo starannie, aby zmierzyć temperaturę różnych części nieba. Była ona wszędzie jednakowa z nadzwyczajną dokładnością (powyżej jednej setnej procent), co wywoływało pewien niepokój. Dlaczego? Otóż, jeśli dwa ciała mają dokładnie tę samą temperaturę, można przyjąć, że kiedyś się ze sobą kontaktowały. A przecież eksperci są pewni, że różne obszary o tej samej temperaturze nigdy się ze sobą nie zetknęły. Nie - prawie nigdy. Nigdy.

Astrofizycy mogą się wyrażać tak kategorycznie, gdyż obliczyli, jak daleko od siebie znajdowały się dwa fragmenty nieba wtedy, gdy wyemitowane zostało promieniowanie, które zaobserwował *COBE*. Stało się to 300 tysięcy lat po Wielkim Wybuchu. Nie tak wcześniej, jakby się chciało, ale, niestety, nie możemy się już bardziej cofnąć. Okazuje się, że odległości te były tak wielkie, że obszary nie mogłyby się ze sobą skomunikować nawet z prędkością światła. A mimo to mają jednakową, albo prawie jednakową, temperaturę. Nasza teoria Wielkiego Wybuchu nie potrafiła tego uzasadnić. Porażka? Kolejny cud? Problem ten zapisał się w historii nauki pod nazwą kryzysu przyczynowości lub izotropii. Przyczynowości, ponieważ zdawał się istnieć przyczynowy związek między rejonami nieba, które nie powinny były mieć ze sobą żadnego kontaktu. „Izotropii”, ponieważ gdziekolwiek by nie spojrzeć, w wielkiej skali ukazuje się mniej więcej ten sam układ gwiazd, galaktyk, gromad i pyłu. Można by przejść nad tym faktem do porządku dziennego, mówiąc, że podobieństwo miliardów kawałków Wszechświata, które nigdy się ze sobą nie kontaktowały, jest czystym przypadkiem. Ale my nie lubimy przypadków. Cuda są do przyjęcia tylko wtedy, gdy się gra na loterii albo kibicuje drużynie futbolowej,

lecz nie w nauce. Kiedy pojawiają się cuda, zaczynamy podejrzewać, że coś głębszego czyha w mroku. Jeszcze do tego powrócimy.

Akcelerator z nieograniczonym budżetem

Inny wielki sukces modelu Wielkiego Wybuchu wiąże się ze składem chemicznym naszego Wszechświata. Można sobie myśleć o świecie jako o tworze złożonym z powietrza, ziemi, wody (ogień pominię) i tablic reklamowych, ale jeśli spojrzymy w górę przez teleskop wyposażony w spektroskop, znajdziemy głównie wodór i hel. Pierwiastki te stanowią 98 procent Wszechświata. Na pozostałe dwa procent składa się dziewięćdziesiąt kilka pierwiastków. Dzięki teleskopowi ze spektroskopem znamy względne obfitości lżejszych pierwiastków. I proszę! Teoretycy Wielkiego Wybuchu mówią, że są one dokładnie takie, jakich się należało spodziewać. A oto skąd to wiemy.

Prenatalny Wszechświat zawierał w sobie całą obecnie obserwowaną materię: około stu miliardów galaktyk, a w każdej sto miliardów słońc (słyszysz głos Carla Sagana?). Wszystko, co dziś widzimy, było ściśnięte do wielkości znacznie mniejszej niż główka szpilki. To dopiero ciasnota! Temperatura świata wynosiła wtedy 10^{32} kelwinów, znacznie więcej niż dzisiejsze 3 kelwiny. W konsekwencji materia występowała w postaci swych najbardziej pierwotnych składników. Nie bez pewnej dozy prawdopodobieństwa możemy wyobrazić sobie młody Wszechświat jako gorącą zupę, która składała się z kwarków i leptonów (czy czegośkolwiek innego, co te cząstki mają w środku, jeśli w ogóle coś mają) zderzających się ze sobą z energiami sięgającymi 10^{19} GeV, czyli bilion razy większymi niż najpotężniejszy akcelerator, jaki możemy sobie wyobrazić. W tak mikroskopowej skali grawitacja srożyła się jako potężna (choć dziś słabo rozumiana) siła.

Po tym efektownym początku nastąpiło rozszerzanie się i stygnięcie. W miarę jak Wszechświat stygł, zderzenia stawały się coraz mniej gwałtowne. Kwarki zaczęły się zlewać w protony, neutrony i inne hadrony. Przedtem jakkolwiek związek tego typu rozpadłby się pod wpływem gwałtownych zderzeń, ale świat stygł niepowstrzymanie i zderzenia stawały się coraz delikatniejsze. Gdy świat miał trzy minuty, był już dostatecznie chłodny, by protony i neutrony zaczęły się łączyć w trwałe jądra. Nastąpił okres nukleosyntezy, a ponieważ dysponujemy sporą wiedzą z zakresu fizyki jądrowej, potrafimy obliczyć względne obfitości powstałych wtedy pierwiastków chemicznych. Były to przede wszystkim jądra najlżejszych pierwiastków - cięższe wymagają dłuższego gotowania we wnętrzu gwiazd. Oczywiście, atomy (jądro wraz z elektronami) powstały dopiero wtedy, gdy temperatura spadła już dostatecznie, aby elektrony mogły ulokować się wokół jądra. Odpowiednia temperatura zapanowała 300 tysięcy lat po Wielkim Wybuchu; do tej chwili atomy nie istniały i chemicy byli niepotrzebni. Kiedy już pojawiły się neutralne atomy, fotony mogły zacząć poruszać się bez przeszkód i dlatego właśnie informacja niesiona przez mikrofalowe fotony pochodzi z tak późnego okresu.

Nukleosynteza to wielki sukces: obliczone ilości dokładnie pokrywają się ze zmierzonymi! Ponieważ obliczenia opierają się na mieszance fizyki jądrowej, oddziaływania słabego i warunków panujących we wczesnym Wszechświecie, taka zgodność stanowi bardzo mocny argument na rzecz teorii Wielkiego Wybuchu.

Opowiadając tę historię wyjaśniałem jednocześnie związek między mikroświatem i makroświatem. Wczesny Wszechświat nie był niczym innym, jak laboratorium akceleratorowym z nieograniczonym budżetem. Aby budować modele ewolucji Wszechświata, astrofizycy chcą jak najwięcej wiedzieć o oddziaływaniach, kwarkach oraz leptonach. I, jak podkreślałem w części *Akselatory...*, fizycy cząstek elementarnych otrzymują dane z tego Wielkiego Eksperymentu Bogini. Choć jeśli mówimy o okresie sprzed 10^{-13} sekundy od stworzenia, mamy znacznie mniejszą pewność co do tego, jakie wówczas panowały prawa przyrody.

Niemniej z biegiem lat coraz lepiej rozumiemy teorię Wielkiego Wybuchu i ewolucję Wszechświata. Obserwacji dokonujemy teraz, 15 miliardów lat po fakcie. Informacje, które obijały się po świecie przez niemal cały ten okres, od czasu do czasu trafiają do naszych laboratoriów. Korzystamy także z pomocy modelu standardowego i danych pochodzących z akceleratorów, które go potwierdzają, a nawet próbują rozszerzyć. Jednak teoretycy się niecierpliwią: brak im niepodważalnych danych dotyczących energii panujących we Wszechświecie, który liczył sobie 10^{-13} sekundy. Astrofizycy chcą poznać prawa przyrody działające nawet jeszcze wcześniej, więc domagają się, by teoretycy zakasali rękawy i pisali artykuły: o Higgsie, unifikacji, o tym, czy kwarki mają jakieś cząstki składowe, i o mnóstwie spekulatywnych teorii, które wykraczają poza model standardowy. Mają nadzieję, że w ten sposób powstanie doskonalszy opis przyrody i otworzy się droga do zrozumienia Wielkiego Wybuchu.

Teorie takie i siakie

Jest godzina pierwsza piętnaście po północy. Siedzę w moim gabinecie. Kilkaset metrów stąd w akceleratorze Fermilabu zderzają się protony i antyprotony, a dwa ogromne detektory zbierają dane. Zaprawiona w bojach grupa trzystu czterdziestu dwóch naukowców i studentów pracuje w CDF, wypróbowując nowe elementy detektora, który waży pięć tysięcy ton. Oczywiście, pracują nie wszyscy naraz. O tej porze w pomieszczeniu kontrolnym zazwyczaj znajduje się kilkanaście osób. Nieco dalej, na obwodzie pierścienia, mieści się nowy detektor, D-zero, nad którego ustawieniem pracuje trzystu dwudziestu jeden fizyków. Eksperyment trwający już od miesiąca miał - jak to zwykle bywa - trudne początki. Będzie kontynuowany przez szesnaście miesięcy (z krótką przerwą na uruchomienie nowego urządzenia, które umożliwi zwiększenie częstości zderzeń). Choć głównym celem eksperymentu jest poszukiwanie kwarka t , sprawdzanie i rozszerzenie modelu standardowego stanowi istotną część naszej działalności.

Około ośmiu tysięcy kilometrów stąd nasi koledzy z CERN także się trudzą, testując rozmaite teoretyczne propozycje rozszerzenia modelu standardowego. Podczas gdy my oddajemy się tej dobrej, czystej robocie, teoretycy nie próżnują. Chciałbym teraz przedstawić skróconą wersję trzech najbardziej intrygujących teorii oglądanych z punktu widzenia hydraulika. Mam tu na myśli GUT (od ang. *Great Unified Theory*), supersymetrię (Susy) i superstruny. Będzie to bardzo powierzchowny przegląd; niektóre z tych spekulacji mają tak niezmierną głębię, że jedynie ich twórcy, matki twórców i, być może, kilku ich bliskich przyjaciół, potrafią w pełni je docenić.

Ale najpierw uwaga na temat znaczenia słowa „teoria”, wokół którego powstają nieporozumienia. „To tylko twoja teoria” - słyszymy często w formie zarzutu. Albo: „To tylko teoria”. Sami ponosimy winę za niepoprawne używanie tego pojęcia. Teoria kwantowa albo teoria Newtona są w pełni udowodnionymi i zweryfikowanymi składnikami naszego światopoglądu. Nie ma co do nich żadnych wątpliwości. Chodzi tylko o historię kształtowania się tego pojęcia. Dawno, dawno temu rzeczywiście była to „tylko teoria” Newtona (do pewnego czasu nie zweryfikowana). Potem ją potwierdzono, ale nazwa do niej przyłgnęła i już na zawsze pozostała teorią Newtona. Z drugiej strony, superstruny i GUT są spekulatywnymi próbami poszerzenia naszych horyzontów, budowaniem na fundamencie tego, co już wiemy. Lepsze teorie poddają się weryfikacji. Dawno temu warunek weryfikowalności był warunkiem *sine qua non* każdej teorii. Obecnie, kiedy rozważamy przebieg zdarzeń zaraz po Wielkim Wybuchu, chyba po raz pierwszy znajdujemy się w sytuacji, gdy teoria, być może, nigdy nie zostanie sprawdzona eksperymentalnie.

GUT-y

Omówiłem już unifikację oddziaływań słabego i elektromagnetycznego w oddziaływanie elektroslabe, przenoszone przez kwartet cząstek: W^+ , W^- , Z^0 i foton. Opisałem także QCD - chromodynamikę kwantową - która zajmuje się kwarkami w trzech kolorach oraz gluonami. Oddziaływania te są opisywane przez kwantowe teorie pola odwołujące się do symetrii cechowania.

Próby połączenia QCD z oddziaływaniem elektroslabym znane są pod nazwą Wielkich Teorii Unifikacji (*Grand Unification Theories*, w skrócie GUTs). Elektroslaba unifikacja ujawnia się w świecie, w którym temperatura przekracza 100 GeV (jest z grubsza równoważna masie cząstki W albo temperaturze 10^{15} kelwinów). Jak podałem w części poprzedniej, potrafimy osiągnąć tę temperaturę w laboratorium. Z kolei unifikacja, o której mówią teorie GUT, wymaga temperatur sięgających 10^{15} GeV, co lokuje ją poza zasięgiem nawet najbardziej maniakałnego budowniczego akceleratorów. Wielkość tę otrzymano, porównując trzy parametry, które określają siłę oddziaływań słabego, elektromagnetycznego i silnego. Dysponujemy pewnymi danymi wskazującymi na to, że parametry te rzeczywiście zmieniają się ze wzrostem energii: silne oddziaływanie słabnie, a słabe staje się silniejsze. Zrównanie wszystkich trzech parametrów następuje przy energii 10^{15} GeV. Jest to obszar wielkiej unifikacji, miejsce, gdzie symetria praw przyrody osiąga nowy, wyższy poziom. Powtarzam, że teoria ta wciąż czeka na potwierdzenie, choć eksperymenty dotyczące tych trzech oddziaływań wskazują na to, iż złączenie się przy tej energii jest możliwe.

Powstało wiele Wielkich Teorii Unifikacji, bardzo wiele, i każda z nich ma swoje wady i zalety. Jedna z wcześniejszych wersji zakładała na przykład nietrwałość protonu i przewidywała jego rozpad na neutralny pion i pozyton. Według tej teorii przeciętny czas życia protonu miał wynosić 10^{30} lat. Ponieważ Wszechświat jest znacznie młodszy - liczy nieco ponad 10^{10} lat - niezbyt wielu protonom udało się rozpaść. Rozpad protonu byłby niezwykle spektakularnym zjawiskiem. Pamiętaj, że do tej pory uważaliśmy proton za cząstkę trwałą i bardzo dobrze, bo stosunkowo trwały proton ma ogromne znaczenie dla przyszłości Wszechświata oraz dalszego rozwoju gospodarczego. Mimo bardzo nie-

wielkiej częstości obserwowanych rozpadów, doświadczalne sprawdzenie trafności tej teorii jest wykonalne. Jeśli na przykład średni czas życia protonu wynosi rzeczywiście 10^{30} lat i jeśli przez rok obserwujemy jeden proton, to prawdopodobieństwo, że zarejestrujemy jego rozpad, wynosi jeden podzielone przez 10^{30} , czyli 10^{-30} . Zamiast tego możemy obserwować wiele protonów. W dziesięciu tysiącach ton wody tkwi około 10^{33} protonów (uwierz mi). Oznacza to, że w ciągu roku około tysiąca protonów powinno ulec rozpadowi.

Przedsiębiorczy fizycy zeszli więc do podziemi: do kopalni soli położonej pod dnem jeziora Erie, w stanie Ohio, do kopalni ołowiu pod górą Toyama w Japonii i do tunelu pod Mt. Blanc łączącego Francję i Włochy. Wszystko to po to, by schronić się przed wpływem promieniowania kosmicznego. W tunelach i głębokich kopalniach umieścili ogromne, przezroczyste pojemniki z czystą wodą - około dziesięciu tysięcy ton wody. Byłyby to wodny sześcian o boku długości 23 metrów. Wodzie przyglądały się setki wielkich i bardzo czułych fotopowielaczy, których zadaniem było rejestrowanie rozbłysku energii uwolnionej podczas rozpadu protonu. Jak dotąd nie zaobserwowano takiego rozpadu. Nie oznacza to jednak, że te ambitne eksperymenty okazały się bezwartościowe, bo dzięki nim zdołano określić nową granicę długości życia protonu. Uwzględniając niedoskonałość pomiaru, średni czas życia protonu - jeśli ta cząstka rzeczywiście ulega rozpadowi - musi być dłuższy od 10^{32} lat.

Długie i bezowocne oczekiwanie na rozpad protonu przerwało niespodziewane wydarzenie. Wspominałem już o wybuchu supernowej, który zarejestrowano w lutym 1987 roku. W podziemnych detektorach pod jeziorem Erie i pod górą Toyama jednocześnie zaobserwowano nagłe pojawienie się neutrin. Wszystko to było wręcz obrzydliwie zgodne z modelami gwiazdnych eksplozji. Ach, jak astrofizycy się wówczas puszyli. Ale protony po prostu nie chcą się rozpadać.

GUT-y nie mają się najlepiej, choć, jak zwykle, odporni teoretycy nie ustają w swych poszukiwaniach. Nie trzeba budować akceleratora osiągającego energię, o której mówi się w takich teoriach, by je wypróbować. Oprócz rozpadu protonów z teorii tych wynikają inne sprawdzalne konsekwencje. Na przykład teoria SU(5) stwierdza, że ładunek elektryczny jest skwantowany i najmniejsza jego porcja równa się jednej trzeciej ładunku elektronu (pamiętasz ładunki kwarków?). Bardzo ciekawe. Można również próbować umieścić kwarki i leptony w jednej rodzinie. Zgodnie z tą teorią kwarki (wewnątrz protonu) mogą przekształcić się w leptony i *vice versa*.

GUT-y przewidują istnienie supermasywnych cząstek (bozonów X), które są tysiąc bilionów razy cięższe od protonów. Sama możliwość istnienia czegoś takiego i pojawienia się w postaci cząstki wirtualnej ma jednak niewielkie konsekwencje, podobnie jak na przykład rzadko spotykany rozpad protonu. Na marginesie chcę dodać, że z takiego rozpadu wynikałyby pewne praktyczne, dość niezwykle wnioski. Jeśli dałoby się zamienić jądro wodoru (pojedynczy proton) w czyste promieniowanie, to byłoby ono sto razy wydajniejszym źródłem energii niż reakcje termojądrowe. Kilka ton wody mogłoby dostarczyć energii zużywanej przez Stany Zjednoczone w ciągu jednej doby. Oczywiście, musielibyśmy podgrzać tę wodę do temperatur GUT, ale być może jakiś maluch w zęrowce, którego właśnie zniechęca do nauki niewrażliwa nauczycielka, wpadłby na dobry pomysł i cała rzecz stałaby się wykonalna. Dlatego: pomagajmy nauczycielom!

Przy temperaturach GUT (10^{28} K) symetria i prostota osiągają poziom, na którym istnieje tylko jeden rodzaj materii (lepto-kwark?) i jedno oddziaływanie z całym wachlarzem cząstek-nośników oraz... no tak, dynda tam jeszcze z boku grawitacja.

Susy

Supersymetria, czyli Susy, jest faworytką wielu teoretyków. Z Susy spotkaliśmy się już wcześniej. Teoria ta łączy cząstki materii (kwarki i leptony) i nośniki oddziaływania (gluony, cząstki W ...). Formuluje wielką liczbę przewidywań, które można sprawdzać doświadczalnie, choć żadne (jak dotąd) nie zostało potwierdzone. Ale zabawa jest świetna!

Mamy grawitina i wina, gluina i fotina - przypominające materię cząstki, które są partnerami grawitonów, cząstek W i całej reszty. Mamy supersymetrycznych partnerów kwarków i leptonów: skwarki i sleptony. Na teorii tej ciąży obowiązek wyjaśnienia, dlaczego owi partnerzy - po jednym dla każdej ze znanych cząstek - nie zostali jak dotąd zauważeni. Och, mówią teoretycy, przypomnij sobie antymaterię. Aż do lat trzydziestych nikomu się nie śniło, że każda cząstka miałaby mieć bliźniaczą antycząstkę. I pamiętaj, że symetrie są tworzone tylko po to, żeby ich nie zachowywać. Nie widziano cząstek-partnerów dlatego, że są ciężkie. Zbudujcie dostatecznie duży akcelerator, a zaraz się pojawią.

Teoretycy o bardziej matematycznym nastawieniu zapewniają nas wszystkich, że teoria ta odznacza się wspaniałą symetrią pomimo tak obscenicznego rozmnożenia się cząstek. Poza tym Susy obiecuje, że doprowadzi nas do wspaniałej, kwantowej teorii grawitacji. Nieskończoności osaczyły ze wszystkich stron nasze próby skwantowania ogólnej teorii względności - teorii opisującej grawitację - i w żaden sposób nie można ich było zrenormalizować. Susy obiecuje, że sobie z tym poradzi.

Ponadto Susy mityguje Higgsa, który pozbawiony symetrii nie mógłby spełniać wyznaczonego mu zadania. Higgs - bozon skalarny o zerowym spinie - jest szczególnie wrażliwy na wszystkie procesy zachodzące w otaczającej go rojnej próżni. Na jego masę wywierają wpływ wszystkie cząstki o najrozmaitszych masach, które przelotnie zajmują jego miejsce. Każda z nich przyczynia się do wzrostu energii, a zatem i masy; biedny Higgs stałby się w końcu zbyt opasły i nie mógłby uratować teorii oddziaływania elektroslabego. Natomiast w Susy wszystkie cząstki-partnerzy wpływają odwrotnie na masę Higgsa - cząstka W sprawia, że Higgs robi się cięższy, ale wina niweluje ten efekt. W ten sposób może on dzięki tej teorii zachować użyteczną masę. Jednak wszystko to nie dowodzi wcale, że Susy jest prawdziwa. Choć z całą pewnością jest piękna.

Jeszcze bardzo daleko do rozwiązania problemu. Pojawiają się słowa-hasła: super-grawitacja, geometria superprzestrzeni - elegancka matematyka, obezwładniająco skomplikowana. Jednak szczególnie interesującą i dającą się sprawdzić doświadczalnie konsekwencją wynikającą z Susy jest to, że chętnie i szczerze dostarcza ona kandydatów do roli ciemnej materii: trwałych, obojętnych cząstek, które byłyby dostatecznie masywne, by mogły pełnić rolę wszechobecnego materiału wypełniającego Wszechświat dostępny naszym obserwacjom. Cząstki zapowiadane przez Susy miałyby jakoby pochodzić z ery Wielkiego Wybuchu i najlżejsze z nich - jakieś fotina, higgsina czy grawitina - mogłyby dotrzeć do naszych czasów, tworząc ciemną materię i zadowolając poszukujących jej astronomów. Następna generacja maszyn musi albo potwierdzić prawdziwość Susy, albo ją odrzucić, ale tymczasem... Och, cóż to za dziewczyna!

Superstruny

O ile dobrze pamiętam, tygodnik „Time” przyczynił się do upiększenia słownika fizyki cząstek elementarnych, nazywając tę teorię Teorią Wszystkiego (*Theory of Everything*, czyli TOE). W jednej z niedawno wydanych książek ujęto to jeszcze lepiej. Jej tytuł brzmi: *Superstruny, Teoria Wszystkiego?* (tytuł ten należy czytać tonem pytającym). Teoria strun obiecuje jednolity opis wszystkich oddziaływań, także grawitacji, wszystkich cząstek, przestrzeni i czasu; opis wolny od arbitralnych parametrów i nieskończoności. Krótko mówiąc: wszystko. W teorii tej zastąpiono punktowe cząstki króciuteńkimi odcinkami strun. Superstruny wymagały rozwinięcia nowych koncepcji matematycznych (jak to już w fizyce czasem się zdarzało) i w sposób ekstremalny obnażyły ograniczenia ludzkiej wyobraźni. Tworzenie tej teorii ma własną historię i bohaterów: Gabrielle Veneziano, John Schwarz, André Neveu, Pierre Ramond, Jeff Harvey, Joel Sherk, Michael Green, David Gross oraz uzdolniony lider o charyzmatycznej osobowości - Edward Witten. Czterech wybitnych teoretyków pracowało razem w podejrzanej instytucji w stanie New Jersey i zasłynęli w świecie jako Kwartet Strunowy z Princeton.

Teoria strun opisuje bardzo odległe miejsce, prawie tak odległe, jak Atlantyda czy kraina Oz. Mówimy o obszarze Plancka. Jeśli on w ogóle kiedykolwiek istniał (podobnie jak Oz), to tylko w najwcześniejszych chwilach po Wielkim Wybuchu. Nie ma mowy, byśmy mogli wyobrazić sobie dane doświadczalne pochodzące z tej epoki. To wcale nie znaczy, że nie powinniśmy próbować. Przypuśćmy, że uda się znaleźć matematycznie spójną (pozbawioną nieskończoności) teorię, która w jakiś sposób opisze Oz, a jej konsekwencją przy bardzo niskich energiach będzie model standardowy. Jeśli ponadto taka teoria będzie jednoznaczna, wszyscy się uradujemy i precz odrzucimy ołówki i kielnie. Jednak teoria superstrun nie jest jednoznaczna. Pośród głównych założeń tej teorii znajdziemy wielką liczbę możliwych dróg prowadzących do danych eksperymentalnych. Zobaczmy, co jeszcze głosi ta teoria, nie udając nawet, że próbujemy to zrozumieć. No tak, jak już wspomniałem w rozdziale ósmym, superstruny wymagają dziesięciu wymiarów: dziewięciu wymiarów przestrzennych i jednego wymiaru czasowego.

Wszyscy dobrze wiemy, że istnieją tylko trzy wymiary przestrzenne, choć odbyliśmy wcześniej małą rozgrzewkę, wyobrażając sobie, iż żyjemy w dwuwymiarowym świecie. Więc czemuż by nie dziewięć? „Gdzie one są?” - możesz słusznie zapytać. Zwinięte. Zwinięte? Ba! Teoria zaczęła od grawitacji, która opiera się na geometrii. Można więc wyobrazić sobie sześć wymiarów pozwijanych w maciupeńkie kulki. Średnica takiej kulki jest typowa dla skali Plancka - 10^{-33} cm - równa mniej więcej rozmiarowi struny zastępującej punktowe cząstki. Cząstki, które znamy, pojawiły się na skutek drgania owych strun. Napięta struna lub drut może drgać na nieskończenie wiele sposobów. To zjawisko leży u podstaw budowy skrzypiec i lutni, jeśli przypominasz sobie spotkanie z ojcem Galileusza. Drgania rzeczywistych strun klasyfikuje się w kategoriach częstości podstawowej i jej częstości harmonicznych. Matematyka mikrostrun jest podobna. Nasze cząstki są „przejawem” drgań o najniższej częstości.

W żaden sposób nie zdołam przekazać tego, co tak bardzo poruszyło twórców tej teorii. Kilka lat temu Ed Witten wygłosił w Fermilabie wspaniałą, porywającą wykład o tym wszystkim. Po raz pierwszy w życiu zdarzyło mi się wysłuchać wykładu, po którym nastąpiło prawie dziesięć sekund ciszy (to sporo!), a potem dopiero owacje. Popędziłem do laboratorium, by tam podzielić się z kolegami tym, co właśnie usłyszałem, ale zanim

tam dotarłem, większość wiadomości mi się ulotniła. Wspaniały wykładowca sprawia, że masz wrażenie, iż zrozumiałeś wykład.

W miarę jak teoria zaczęła się odwoływać do coraz trudniejszej matematyki i zaczęły się mnożyć nowe kierunki jej rozwoju, podniecenie związane z superstrunami opadło do bardziej rozsądnego poziomu. Teraz już wypada tylko czekać. Wielu bardzo zdolnych teoretyków wciąż darzy superstruny dużym zainteresowaniem, ale przypuszczam, że minie jeszcze wiele czasu, zanim Teoria Wszystkiego osiągnie poziom modelu standardowego.

Płaskość i ciemna materia

Oczekując na sukcesy teorii, odkrywamy w Wielkim Wybuchu wciąż nowe zagadki. Pozwolę sobie zwrócić uwagę na jeszcze jeden problem, który konfundował fizyków, a jednocześnie doprowadził nas - zarówno teoretyków, jak i eksperymentatorów - do pewnych oszałamiających koncepcji na temat Samego Początku. Chodzi o problem płaskości, który ma bardzo ludzkie zabarwienie: wiąże się z naszym chorobliwym zainteresowaniem losem Wszechświata. Czy będzie się rozszerzał wiecznie, czy też zwolni tempo i zacznie się kurczyć? Zależy to od tego, ile masy grawitacyjnej znajduje się we Wszechświecie. Jeśli jest jej dosyć, ekspansja ulegnie zatrzymaniu, odwróceniu i nastąpi Wielki Kolaps. Mamy wówczas Wszechświat zamknięty. Jeśli masy jest za mało, Wszechświat będzie nieustannie się rozszerzał i stygł - to Wszechświat otwarty. Między tymi dwiema możliwościami znajduje się Wszechświat „o masie krytycznej”, taki, który ma akurat dosyć materii, by mała tempo ekspansji, ale nie dość, żeby ją odwrócić. Wszechświat płaski.

Pora na przykład. Wyobraź sobie raketę wysyłaną z Ziemi w przestrzeń kosmiczną. Jeśli nadamy rakiecie zbyt małą prędkość, spadnie z powrotem na Ziemię (Wszechświat zamknięty). Oddziaływanie grawitacyjne Ziemi jest zbyt silne, by rakietą mogła je pokonać. Jeśli rozpędzimy ją do ogromnej prędkości, wyrwie się spod wpływu przyciągania ziemskiego i polecą gdzieś daleko w Układ Słoneczny (Wszechświat otwarty). Istnieje jednak prędkość krytyczna: jeśli prędkość rakiety jest od niej minimalnie mniejsza, spadamy na Ziemię, a jeśli minimalnie większa, poszybujemy w dal. Z płaskością mamy do czynienia wtedy, gdy prędkość rakiety równa się dokładnie prędkości krytycznej. Rakietę odlatuje, ale ze stale malejącą prędkością. Dla raket startujących z naszej planety ta prędkość krytyczna wynosi 11,3 km/s. Teraz wyobraź sobie raketę poruszającą się z określoną prędkością (Wielki Wybuch) i zastanów się, jaką masę powinna mieć planeta (całkowita gęstość masy we Wszechświecie), aby spowodowała ucieczkę lub upadek rakiety.

Ilość grawitacyjnej masy Wszechświata można ocenić, licząc gwiazdy. To już zostało zrobione i okazało się, że to nie wystarczy, by powstrzymać rozszerzanie się Wszechświata. Wynika stąd, że Wszechświat jest otwarty, i to z całkiem sporym zapasem. Jednak pewne dane wyraźnie wskazują na to, że we Wszechświecie istnieje materia, która nie wysyła promieniowania, czyli „ciemna materia”. Gdy dodamy do siebie ilość obserwowanej materii i przewidywaną ilość ciemnej materii, okazuje się, że masa Wszechświata nie różni się zbytnio od masy krytycznej, w każdym razie nie mniej niż dziesięciokrotnie i nie bardziej niż dwukrotnie. Tak więc pytanie, czy Wszechświat bę-

dzie się ciągle rozszerzał, czy w końcu zacznie się kurczyć, wciąż pozostaje bez odpowiedzi.

Mamy wielu kandydatów na składniki ciemnej materii. Większość z nich to, oczywiście, cząstki o fikuśnych nazwach - aksjony, fotina - nadanych im przez kochających teoretyków-wynalazców. Jedną z bardziej fascynujących kandydatur proponowanych przez model standardowy jest neutrino. Gęstość tych ulotnych obiektów, pozostałych po erze Wielkiego Wybuchu, powinna być ogromna. Neutrino to wprost idealni kandydaci na cząstki składające się na ciemną materię, gdyby... gdyby miały skończoną masę spoczynkową. Wiemy już, że neutrino elektronowe jest zbyt lekkie. Pozostają zatem dwie możliwości, z których faworytem jest neutrino taonowe. Z dwóch powodów: (1) istnieje; (2) nie wiemy prawie nic o jego masie.

Aby sprawdzić, czy neutrino taonowe ma skończoną masę, która mogłaby posłużyć do zamknięcia Wszechświata, przeprowadziliśmy niedawno w Fermilabie pomysłowy i finezyjny eksperyment. (W tym wypadku potrzeby kosmologii określiły rodzaj eksperymentu akceleratorowego, co wskazuje na głębokie związki łączące kosmologię z fizyką cząstek elementarnych).

Wyobraź sobie doktoranta dyżurującego ponurą zimową nocą, uwięzionego w małej chatce na smaganej wichrami prerii, gdzieś w Illinois. Już od ośmiu miesięcy zbierane są dane. Doktorant nadzoruje aparaturę. Co jakiś czas sprawdza rutynowo dane dotyczące masy neutrino. (Masy tej nie mierzymy bezpośrednio; określamy tylko wpływ, jaki mogłaby wywrzeć na pewne reakcje). Nasz doktorant przeprowadza obliczenia z udziałem wszystkich zebranych dotąd danych. Nagle się ożywia. Nie może uwierzyć w to, co ukazuje mu się na ekranie komputera. Sprawdza poprawność działania komputera. Wszystko w najlepszym porządku. Oto jest - masa! Dosyć, żeby zamknąć Wszechświat. Ten dwudziestodwuletni młody człowiek przeżywa niewiarygodne, zapierające dech w piersiach chwile. Jest przekonany, że tylko on jeden na całej planecie, wśród 5,32 miliarda jej mieszkańców, zna przyszłość Wszechświata. To dopiero „Heureka!”

No cóż, miło sobie o tym pomarzyć. Wątek doktoranta był prawdziwy, tylko eksperyment nie wykrył masy. To konkretne doświadczenie po prostu nie było dostatecznie dobre, ale mogło być i... niewykluczone, że kiedyś będzie. Kolego Czytelniku, przeczytaj, proszę, ten ustęp znajomemu zagubionemu nastolatкови *con brio!* Powiedz mu czy jej, że, po pierwsze, eksperymenty często się nie udają i, po drugie, nie zawsze się nie udają.

Charlton, Golda i Guth

Ale jeśli nawet jeszcze nie rozumiemy, gdzie skrywa się masa krytyczna potrzebna do tego, by Wszechświat był płaski, jesteśmy w zasadzie pewni, że ona istnieje. A to dlatego, że ze wszystkich możliwych wielkości masy, jakie przyroda mogła wybrać dla swojego Wszechświata (powiedzmy 10^6 razy masa krytyczna albo 10^{-16} razy masa krytyczna), wybrała wielkość prawie krytyczną. Ale to jeszcze nie wszystko. Na cud zakrawa to, że Wszechświat w ciągu 15 miliardów lat uniknął dwóch diametralnie różnych ewentualności: nie rozprysł się w natychmiastowej, niepohamowanej ekspansji ani nie zapadł się w gwałtownym kolapsie. Okazuje się, że w wieku jednej sekundy Wszechświat musiał być niemal doskonale płaski. W przeciwnym razie albo mielibyśmy Wielki Kolaps, jeszcze zanim powstałoby choćby jedno jądro, albo gwałtowne rozszerzanie się

Wszechświata szybko doprowadziłyby go do stanu lodowatej martwoty. Znow cud! Niezależnie od tego, czy uczeni wyobrażają sobie Mędrca, Starca, czy postać w rodzaju Charltona Hestona - z długą sztuczną brodą, otoczonego dziwną laserową poświatą - czy też (jak ja to sobie wyobrażam) bóstwo w typie Margaret Mead, Goldy Meir czy Margaret Thatcher, umowa mówi wyraźnie, że praw przyrody się nie poprawia, że są takie, jakie są. Problem płaskości wiąże się ze zbyt wieloma cudami i dlatego zaczynamy szukać przyczyn, które sprawiłyby, że płaskość wydałaby się bardziej „naturalna”. Dlatego właśnie mój doktorant odmrażał sobie siedzenie, próbując ustalić, czy neutrina mogą tworzyć ciemną materię, czy nie. Nieskończone rozszerzanie się czy Wielki Kolaps? Po prostu chciał to wiedzieć. My też chcemy.

Zagadnienie płaskości, problem jednorodności promieniowania o temperaturze trzech kelwinów i kilka innych problemów związanych z modelem Wielkiego Wybuchu zostały rozwiązane, przynajmniej teoretycznie, przez Alana Gutha - teoretyka cząstek pracującego w MIT. Jego poprawka znana jest pod nazwą inflacyjnego modelu Wielkiego Wybuchu.

Inflacja i cząstka skalarna

W tej skróconej historii ostatnich 15 miliardów lat zapomniałem wspomnieć, że ewolucja Wszechświata w zasadzie w całości zawiera się w równaniach Einsteina dotyczących ogólnej teorii względności. Kiedy Wszechświat ostygł do temperatury 10^{32} kelwinów, pałeczkę przejmuje klasyczna (nie-kwantowa) teoria względności i następne wydarzenia są już po prostu konsekwencjami teorii Einsteina. Niestety, to nie sam Mistrz odkrył potęgę teorii względności, lecz jego następcy. W roku 1916, przed Hubble'em i Knubbe'em, sądzono, że Wszechświat jest znacznie spokojniejszym, statycznym obiektem. Równania przewidywały wprawdzie rozszerzanie się Wszechświata, ale Einstein dodał do nich pewne wyrażenie, by temu zapobiec. Potem sam przyznawał, że była to „największa pomyłka jego życia”. Ponieważ wykład ten nie jest poświęcony kosmologii, na pewno nie uda mi się oddać sprawiedliwości tym zagadnieniom, z których wiele znacznie wykracza poza zakres moich obowiązków służbowych.

Dziełem Gutha było odkrycie procesu, na który zezwalały równania Einsteina. W procesie tym wytwarza się tak wielka energia, że doprowadza do szalonego rozszerzania się Wszechświata, czyli inflacji. W tym czasie - w ciągu około 10^{-33} sekundy - jego rozmiary wzrosły od 10^{-15} metra (znacznie mniej niż średnica protonu) do wielkości piłki golfowej. Ta inflacyjna faza pojawiła się, jak sądzimy, pod wpływem nowego pola - bezkierunkowego (skalarnego) - które wygląda, zachowuje się i pachnie jak... pole Higgsa!

To Higgs! Astrofizycy odkryli działanie Higgsa w całkowicie nowym kontekście. Jaką rolę może odgrywać pole Higgsa w tym dziwnym zdarzeniu, nazwanym przez nas inflacją?

Zauważyliśmy, że pole Higgsa wiąże się ściśle z pojęciem masy. Zakłada się, że pole Higgsa wypełniało przedinflacyjny Wszechświat. Energia tego pola była tak wielka, że doprowadziła do szybkiego rozszerzania się przestrzeni. Tak więc powiedzenie: „Na początku było pole Higgsa”, może rzeczywiście odpowiadać prawdzie. Pole Higgsa - stałe w całej przestrzeni - zmienia się w czasie zgodnie z prawami fizyki. Prawa te w połączeniu z równaniami Einsteina prowadzą do pojawienia się fazy inflacyjnej, która zajmuje kolosalny przedział czasu: 10^{-35} do 10^{-33} sekundy od narodzin Wszechświata.

Kosmolodzy teoretycy opisują początkowy stan jako „fałszywą próżnię” z powodu energii zawartej w polu Higgsa. Przejście do stanu prawdziwej próżni uwalnia tę energię, która stwarza cząstki i promieniowanie o ogromnej temperaturze. Potem następuje stosunkowo lepiej znana faza, polegająca na spokojniejszym rozszerzaniu się i stygnięciu. W wieku 10^{-33} sekundy można już mówić o istnieniu Wszechświata. „Jestem już Wszechświatem” - można zaintonować w tym momencie.

Ofiarowawszy całą swą energię na tworzenie cząstek, Higgs chwilowo usuwa się ze sceny, ale pojawia się kilkakrotnie w różnych przebraniach, aby podtrzymać spójność matematyki, wygaszać nieskończoności i nadzorować narastającą złożoność Wszechświata w okresie, kiedy zaczynają się różnicować oddziaływania i cząstki. Oto Boska Cząstka w całym jej majestacie.

Chwileczkę, to nie ja to wszystko wymyśliłem. Twórca tej teorii, młody fizyk zajmujący się cząstkami elementarnymi, czyli Alan Guth, próbował rozwiązać, zdawałoby się, zupełnie inny problem: standardowy model Wielkiego Wybuchu przewidywał istnienie monopoli magnetycznych - izolowanych, pojedynczych biegunów magnetycznych. Północ i południe miałyby się zatem do siebie tak, jak materia i antymateria. Szukanie monopoli było ulubioną rozrywką łowców cząstek. Wykorzystywano do tych poszukiwań każdą nową maszynę, ale były one bezowocne. Dlatego też monopole są, co najwyżej, bardzo rzadko spotykanymi obiektami, mimo absurdalnej kosmologicznej zapowiedzi, że powinno ich być mnóstwo. Guth, kosmolog amator, wpadł na pomysł inflacji, która pozwoliłaby pozbyć się monopoli magnetycznych z modelu Wielkiego Wybuchu. Potem odkrył, że udoskonalając tę teorię, można usunąć wszystkie inne jej defekty. Guth mówił później, że miał niezwykle szczęście, iż dokonał tego odkrycia, bo wszystkie jego składniki były już znane. Co dowodzi, jak wielkie znaczenie dla aktu twórczego ma cnota niewinności. Wolfgang Pauli skarżył się kiedyś, że utracił zdolności twórcze: „Ach, wiem już zbyt dużo”.

Na zakończenie hołdu składanego Higgsowi powinienem w krótkich słowach wyjaśnić, jak to szybkie rozszerzanie się rozwiązuje kryzys izotropowości, czyli przyczynowości, oraz problem płaskości. Inflacja, która zachodzi z prędkością znacznie przewyższającą prędkość światła (teoria względności nie nakłada żadnych ograniczeń na tempo rozszerzania się przestrzeni), jest dokładnie tym, czego potrzebowaliśmy. Na początku niewielkie obszary przestrzeni znajdowały się w bliskim kontakcie ze sobą. Inflacja znacznie je powiększyła, rozdzielając ich części na obszary przyczynowo rozłączne. Po inflacji rozszerzanie się przebiega z prędkością znacznie mniejszą od prędkości światła, dlatego wciąż odkrywamy nowe obszary Wszechświata, w miarę jak dociera do nas światło od nich biegnące. „Ach - mówi kosmiczny głos - znowu się spotykamy”. Teraz już się nie dziwimy, gdy zauważamy, że odległe rejony są do nas podobne: izotropia!

A płaskość? Inflacyjny Wszechświat daje jasno do zrozumienia, że ma masę krytyczną. Rozszerzanie się będzie przebiegało coraz wolniej, ale nigdy nie ulegnie odwróceniu. Płaskość: w ogólnej teorii względności Einsteina wszystko sprowadza się do geometrii. Obecność masy powoduje zakrzywienie przestrzeni. Im większa jest masa, tym większa krzywizna. Płaski Wszechświat jest sytuacją graniczną między dwiema przeciwstawnymi rodzajami krzywizny. Wielka masa zakrzywia przestrzeń do wewnątrz (przykładem takiej przestrzeni jest powierzchnia kuli). Jest to działanie przyciągające i ma tendencję do zamykania Wszechświata. Mała masa zakrzywia przestrzeń na zewnątrz (tworząc coś w rodzaju siodła). W tym przypadku powstaje Wszechświat otwarty. Wszechświat płaski natomiast ma masę krytyczną, która lokuje się pomiędzy masą

Wszechświata otwartego i zamkniętego. Inflacja polega na tym, że małe kawałki zakrzywionej powierzchni zostaje rozciągnięty do ogromnych rozmiarów, przez co robi się płaski - bardzo płaski. Hipotezę, według której Wszechświat jest tak dokładnie płaski, że znajduje się w stanie idealnego zawieszenia między zapadaniem a rozszerzaniem, można zweryfikować za pomocą obserwacji. Trzeba tylko zidentyfikować składniki ciemnej materii i dalej zmierzyć gęstość masy. Jak nas zapewniają astrofizycy, da się to zrobić.

Jeszcze inne sukcesy inflacyjnego modelu Wszechświata zapewniły mu powszechną aprobatę. Na przykład jedna z „drugorzędnych” niedogodności kosmologii Wielkiego Wybuchu polega na tym, że teoria ta nie pozwala wyjaśnić „grudkowatej” budowy Wszechświata: istnienia galaktyk, gwiazd i całej reszty. Jakościowo, grudkowatość wydaje się zupełnie do przyjęcia. Za sprawą losowych fluktuacji pewna ilość materii zbija się w grudkę zawieszoną w jednorodnej plazmie. Nieduże dodatkowe oddziaływanie grawitacyjne przyciąga do niej jeszcze więcej materii, powodując wzrost siły grawitacji. Proces przebiega dalej i wcześniej czy później mamy do czynienia z galaktyką. Ale szczegółowa analiza wykazuje, że proces ten byłby zbyt powolny, gdyby miał polegać jedynie na „losowych fluktuacjach”, dlatego zarodki, z których powstały galaktyki, musiały zostać wszczepione już w fazie inflacji.

Teoretycy, którzy myśleli o tych zarodkach, wyobrażają je sobie jako niewielkie (mniejsze niż 0,1 procent) odchylenia od przeciętnej gęstości początkowego rozkładu materii. Skąd one się wzięły? Inflacja Gutha dostarcza bardzo atrakcyjnego wytłumaczenia. Trzeba wrócić do kwantowej fazy historii Wszechświata, w której dziwaczne fluktuacje kwantomechaniczne mogą doprowadzić do niewielkich nieregularności. Inflacja powiększa te mikroskopijne fluktuacje do skali porównywalnej z galaktykami. Najnowsze wyniki obserwacji (ogłoszono je w kwietniu 1992 roku), których dokonał satelita *COBE*, dotyczące małych różnic w temperaturze mikrofalowego promieniowania tła pochodzącego z różnych kierunków na niebie, są zachwycająco zgodne ze scenariuszem inflacyjnym.

To, co zobaczył satelita *COBE*, odzwierciedla warunki, które panowały w młodym (mającym 300 tysięcy lat) Wszechświecie, naznaczonym piętnem niejednorodności spowodowanych przez inflację. To one sprawiały, że temperatura promieniowania tła wzrastała tam, gdzie Wszechświat był gęstszy, a obniżała się w obszarach o mniejszej gęstości. W ten sposób obserwowane różnice temperatury dostarczyły eksperymentalnego dowodu na istnienie zarodków, bez których galaktyki nie mogłyby powstać. Nic dziwnego, że wiadomość o tym trafiła na pierwsze strony gazet na całym świecie. Różnice temperatur wynosiły tylko kilka milionowych części stopnia i wykrycie ich wymagało nadzwyczajnej staranności przy dokonywaniu pomiarów, ale jakież przyniosły one efekty! Pozwoliły wykryć ślady grudek istniejących w homogenicznej brei, grudek, które dały początek galaktykom, słońcom, planetom i nam. „Czuliśmy się tak, jakbyśmy zobaczyli oblicze Boga” - powiedział rozradowany astronom George Smoot.

Heinz Pagels podkreśla filozoficzne znaczenie fazy inflacyjnej jako ostatecznej wieży Babel, która nie pozwala stwierdzić, co było przedtem. Inflacja rozciągnęła i rozwodziła wszelkie wcześniej powstałe struktury, więc choć dysponujemy ciekawą historią stworzenia od chwili 10^{-33} sekundy aż do 10^{17} sekund (dziś), to przecież nie unikniemy pytań tych utrapionych dzieciaków, które będą chciały się dowiedzieć: skoro Wszechświat istnieje, jak się zaczął?

W roku 1987 zorganizowaliśmy w Fermilabie konferencję poświęconą „obliczu Boga”, na której astro/kosmo/teoretycy zebrali się, by przedyskutować początki ewolucji Wszechświata. Konferencja ta była oficjalnie poświęcona kosmologii kwantowej i została zwołana po to, by eksperci mogli wspólnie poużalać się nad rozmiarami swej niewiedzy. Nie dysponujemy zadowalającą teorią grawitacji i dopóki taka nie powstanie, nie radzimy sobie z opisem fizycznej sytuacji Wszechświata w najwcześniejszych jego chwilach.

Na konferencji obecny był kwiat tej egzotycznej dyscypliny: Stephen Hawking, Murray Gell-Mann, Jakow Zeldowicz, Andriej Linde, Jim Hartle, Mike Turner, Rocky Kolb, David Schramm i inni. Prowadzono ożywione dyskusje, bardzo abstrakcyjne i naszpikowane matematyką. Nie rozumiałem większości tego, co tam mówiono, ale bardzo mi się podobał podsumowujący referat o początkach Wszechświata, wygłoszony w niedzielny poranek przez Stephena Hawkinga. Mniej więcej o tej samej porze w całych Stanach Zjednoczonych przy szesnastu tysiącach czterystu dwadziestu siedmiu innych pulpitych głośzono nauki. Z jedną wszakże różnicą. Rzecz w tym, że referat Hawkinga został nam przekazany za pomocą syntezatora głosu, co nadawało mu pewną szczególną aurę. Jak zwykle miał on wiele ciekawych i skomplikowanych rzeczy do powiedzenia, ale najgłębszą myśl wyraził całkiem prosto: „Wszechświat jest tym, czym jest, bo był tym, czym był”.

Hawking mówił o tym, że zadanie teorii kwantowej w odniesieniu do kosmologii polega na określeniu warunków początkowych, które musiały panować w chwili narodzin Wszechświata. Zakładał przy tym, że stosowne prawa przyrody - które (mamy nadzieję) zostaną sformułowane przez jakiegoś geniusza, obecnie ucznia trzeciej klasy szkoły podstawowej - zaczną wtedy działać i opiszą dalszy przebieg ewolucji. Nowa wspaniała teoria powinna łączyć w sobie opis warunków początkowych Wszechświata z doskonałym zrozumieniem praw przyrody, tak aby mogła wytłumaczyć wszystkie obserwacje kosmologiczne. Jej konsekwencją musi być obecnie przyjmowana wersja modelu standardowego. Jeśli dzięki nadprzewodzącemu superakceleratorowi zdołamy przed tym przełomem sformułować nowy model standardowy, znacznie dokładniej opisujący wszystkie dane zebrane od czasów Pizy, to tym lepiej. Nasz sarkastyczny Pauli narysował kiedyś prostokąt i twierdził, że to kopia najwspanialszego dzieła Tycjana - brakuje tylko pewnych szczegółów. Podobnie nasz obraz *Narodziny i ewolucja Wszechświata* wymaga jeszcze kilku pociągnięć pędzla, ale rama jest piękna.

Przed początkiem czasu

Wróćmy jeszcze na chwilę do prenatalnego Wszechświata. Żyjemy w świecie, o którym sporo wiemy. Jesteśmy jak paleontolodzy, którzy rekonstruują mastodonta na podstawie kawałka golenia, albo jak archeolodzy, którzy potrafią wyobrazić sobie, jak wyglądało dawno wymarłe miasto na podstawie paru starych kamieni. My korzystamy z praw fizyki odsłanianych podczas badań prowadzonych w laboratoriach całego świata. Jesteśmy przekonani - choć nie potrafimy tego udowodnić - że istnieje tylko jedna sekwencja zdarzeń, która odegrana wstecz może prowadzić od obecnie obserwowanego świata do początku i „jeszcze wcześniej”. Aby początek mógł się zdarzyć, prawa przyrody musiały istnieć, zanim jeszcze zaczął się czas. Tak twierdzimy, wierzymy w to, ale czy potrafimy

tego dowieść? Nie. A co z tym: „przed początkiem czasu”? Teraz opuściliśmy dziedzinę fizyki i wkroczyliśmy na obszar filozofii.

Pojęcie czasu związane jest z sekwencją zdarzeń. Zdarzenie określa punkt w czasie. Dwa zdarzenia wyznaczają przedział. Regularna sekwencja zdarzeń pozwala zdefiniować „zegar” - bicie serca, wychylenia wahadła, wschody i zachody Słońca. Wyobraź sobie teraz sytuację, w której nic się nie dzieje. Żadnego tykania, żadnych posiłków, żadnych wydarzeń. Pojęcie czasu nie ma w tym sterylnym świecie żadnego znaczenia. W takim właśnie stanie mógł się znajdować Wszechświat „przed czasem”. Wielkie Wydarzenie - Wielki Wybuch - stanowiło potężny incydent, który między innymi dał początek czasowi.

Chcę przez to powiedzieć, że jeśli nie możemy zdefiniować zegara, to nie dysponujemy także sposobem, by przypisać jakiegokolwiek znaczenie pojęciu czasu. Rozważmy kwantową koncepcję rozpadu cząstki, na przykład naszego starego znajomego - pionu. Dopóki się nie rozpadnie, nie sposób zdefiniować czasu we wszechświecie pionu. Nic w nim nie ulega zmianie. Jego struktura, jeśli w ogóle na czymkolwiek się znamy, jest identyczna i niezmienna aż do chwili, gdy dojdzie do rozpadu w akcie osobistego Wielkiego Wybuchu. Porównaj to z naszym ludzkim doświadczeniem rozpadu osobnika gatunku Homo sapiens. Wierz mi, że jest mnóstwo oznak mówiących o tym, iż proces ten się posuwa, a nawet jest wyraźnie zaawansowany! Jednak w świecie kwantowym pytania: „kiedy rozpadnie się pion?” albo „kiedy nastąpił Wielki Wybuch?”, nie mają żadnego sensu. Z drugiej strony, możemy zapytać: jak dawno temu wydarzył się Wielki Wybuch?

Możemy próbować wyobrazić sobie Wszechświat sprzed Wielkiego Wybuchu: bezczasowy, pozbawiony jakichkolwiek cech, ale w jakiś sposób poddany prawom fizyki. Dzięki nim istnieje skończone prawdopodobieństwo, że Wszechświat - podobnie jak skazany pion - ulegnie eksplozji, przekształceniu, dozna zmiany stanu. Możemy teraz dopracować metaforę, którą umieściłem na początku tej książki. Raz jeszcze porównajmy Wszechświat z okresu Samego Początku do wielkiego głazu znajdującego się na wierzchołku wyniosłej skały, ale teraz ów gład tkwi w koleinie. Według fizyki klasycznej jest to sytuacja stabilna, ale fizyka kwantowa dopuszcza zjawisko tunelowania - jeden z dziwacznych efektów, o którym mówiłem w części piątej - dlatego gład wyskakuje z koleiny, przemyka nad krawędzią urwiska i spadając uwalnia swą energię potencjalną; w ten sposób stwarza znany nam świat. W bardzo spekulatywnych modelach rolę metaforycznego urwiska odgrywa nasz drogi i kochany Higgs.

Krzepiące jest, że podczas podróży do początku Wszechświata potrafimy wyobrazić sobie brak czasu i przestrzeni. Gdy czas i przestrzeń zdążają do zera, równania, których używamy do opisu Wszechświata, załamują się i tracą znaczenie. W tym momencie znajdujemy się już zupełnie poza granicami nauki. Może to i dobrze, że czas i przestrzeń przestają cokolwiek znaczyć. Dzięki temu znikanie pojęć odbywa się gładko. Co pozostaje? Oczywiście prawa fizyki.

Podczas zmagania ze wszystkimi eleganckimi nowymi teoriami dotyczącymi przestrzeni, czasu i początku ogarnia człowieka zniechęcenie. W przeciwieństwie do wszystkich innych okresów w nauce - a zwłaszcza po roku 1500 - wydaje się, że teraz nie mamy szans, by eksperymenty i obserwacje mogły przyczynić się do rozwiązania problemu, w każdym razie nie w ciągu kilku najbliższych dni. Nawet za czasów Arystotelesa można było (podejmując pewne ryzyko) policzyć zęby w pysku konia przed zabraniem głosu w debacie poświęconej końskiemu użębieniu. Obecnie nasi koledzy dys-

kutują nad zagadnieniem, co do którego istnieje tylko jedna jedyna przesłanka: istnienie Wszechświata. Tym sposobem doszliśmy do żartobliwego podtytułu naszego wykładu: Wszechświat jest odpowiedzią, ale niech nas licho porwie, jeśli wiemy, jak brzmi pytanie.

Powrót Greka

Zbliżała się piąta nad ranem. Drzemałem. Nagle usłyszałem hałasy na zewnątrz naszego starego domu w Batawii. Konie były niespokojne i ze stajni dochodził stukot kopyt. Wyszedłem z domu i zobaczyłem, jak ze stodoły wychodzi facet w todzie i nowiutkich sandałach.

LEDERMAN: Demokryt! Co ty tu robisz?

DEMOKRYT: To mają być konie? Trzeba ci było widzieć egipskie konie zaprzęgane do rydwanów; hodowałem je w Abderze. Siedemnaście piędzi i więcej. One wprost latały!

LEDERMAN: Ach tak. Jak się masz?

DEMOKRYT: Dysponujesz wolną godzinką? Zaproszono mnie do pomieszczenia kontrolnego akceleratora o nazwie Pole Czuwania, który właśnie uruchomili w Teheranie 12 stycznia 2020 roku.

LEDERMAN: O rany, mogę iść z tobą?

DEMOKRYT: Jasne, jeśli tylko umiesz się zachować. Weź mnie za rękę i powiedz: *Μασα Πλανχκα* [*masa Plancka*].

LEDERMAN: *Μασα Πλανχκα*.

DEMOKRYT: Głośniej!

LEDERMAN: *Μασα Πλανχκα!*

Nagle znaleźliśmy się w zadziwiająco małej sali, która zupełnie nie przypominała tego, czego się spodziewałem - głównego pokładu gwiazdnego statku *Enterprise*. Było tu kilka kolorowych ekranów z bardzo wyraźnym obrazem (ekrany telewizyjne o dużej rozdzielczości), ale brakowało mi rzędów oscyloskopów i przełączników. W jednym kącie grupa młodych mężczyzn i kobiet prowadziła ożywioną dyskusję. Technik stojący obok mnie naciskał guziki pudełeczka, które trzymał w dłoni, i patrzył na jeden z ekranów. Inny technik mówił po persku do mikrofonu.

LEDERMAN: Dlaczego Teheran?

DEMOKRYT: Kilka lat po zawarciu światowego pokoju ONZ zdecydowała, że akcelerator Nowego Świata zostanie zbudowany na przecięciu antycznych szlaków. Tutejszy rząd jest jednym z najbardziej stabilnych, mamy tu najlepsze podłoże geologiczne, blisko do tanich źródeł energii i wody, pełno wykwalifikowanej siły roboczej i najsmaczniejszy kebab na południe od Abder.

LEDERMAN: Co się tu dzieje?

DEMOKRYT: Maszyna zderza protony z antyprotonami, obie wiązki mają po 500 TeV. Od kiedy nadprzewodzący superakcelerator odkrył w 2005 roku Higgsa o masie

równej 422 GeV, pojawiła się pilna potrzeba zbadania „sektora Higgsa”, by się przekonać, czy jest tylko jeden Higgs, czy więcej.

LEDERMAN: Znaleźli Higgsa?

DEMOKRYT: Jednego z nich. Przypuszczają, że istnieje cała rodzina Higgsów.

LEDERMAN: Coś jeszcze?

DEMOKRYT: Jeszcze jak! Trzeba było widzieć, jak dzięki bezpośredniemu podglądowi danych mogliśmy zaobserwować to niesamowite zdarzenie z sześcioma dżetami i ośmioma parami elektronów. Do tej pory zarejestrowali już kilka skwarków, gluino oraz fotino...

LEDERMAN: Supersymetria?

DEMOKRYT: Tak, ledwie energia maszyny przekroczyła 20 TeV, posypały się te drobiazgi.

Demokryt zawołał do kogoś w języku perskim, wymawiając słowa z wyraźnie obcym akcentem. Zaraz podano nam kubki z gorącym świeżym mlekiem jaków. Gdy zapytałem o ekran, na którym wyświetlane są zdarzenia zachodzące wewnątrz akceleratora, ktoś nałożył mi na głowę hełm. Służył on do oglądania wirtualnej rzeczywistości i zdarzenia zrekonstruowane na podstawie danych dostarczonych przez Bóg-wie-jaki komputer rozbłyły mi przed oczyma. Zauważyłem, że w roku 2020 fizycy (przedszkolaki mojej ery) wciąż odczuwali potrzebę, by przedstawiane im informacje miały postać wizualną. Zbliżyła się do nas wysoka, młoda, czarnoskóra kobieta. Miała spektakularną fryzurę w stylu afro, a w rękę trzymała coś, co wyglądało jak skomputeryzowany notes. Ignorując Demokryta, z rozbawieniem zmierzyła mnie wzrokiem i powiedziała: „Dżinsy - zupełnie takie same, jakie nosił mój dziadek. Pewnie musisz być z centrali ONZ. Prowadzisz u nas inspekcję?”

- Nie - odrzekłem - jestem z Fermilabu, na parę lat wypadłem z obiegu. Co nowego słysząc?

Następna godzina minęła na oszałamiających wyjaśnieniach dotyczących sieci neuronowych, algorytmów identyfikujących dżety, punktów kalibracji kwarka t i cząstki Higgsa, diamentowych półprzewodników formowanych w próżni, femtobajtach i co gorsza - dwudziestu pięciu lat postępów badań eksperymentalnych. Moja rozmówczyni pochodziła ze stanu Michigan, była absolwentką prestiżowej szkoły średniej o profilu matematyczno-fizycznym w Detroit. Jej mąż, asystent z Kazachstanu, pracował na Uniwersytecie w Quito. Kobieta wyjaśniła, że promień urządzenia wynosi tylko 160 kilometrów i że pozostanie przy tym umiarkowanym rozmiarze umożliwił przełom, do którego doszło w 1997 roku, kiedy odkryto nadprzewodniki działające w temperaturze pokojowej. Na imię miała Mercedes.

MERCEDES: Tak, naukowcy pracujący przy nadprzewodzącym superakceleratorze natknęli się na te nowe materiały, gdy śledzili jakieś dziwne własności stopów niobu. Jedno odkrycie prowadziło do następnych i wkrótce dysponowaliśmy tym przełomowym tworzywem, które zaczyna nadprzewodzić już w temperaturze kilkunastu stopni Celsjusza.

LEDERMAN: Jakie jest krytyczne natężenie pola magnetycznego?

MERCEDES: 50 tesli. Jeśli dobrze pamiętam historię, wasza maszyna w Fermilabie miała 4 tesle. Dziś działa dwadzieścia pięć firm, które to produkują. W roku budżetowym 2019 obroty związane z tym wynalazkiem wyniosły około 300 miliardów dolarów.

Superkolej łącząca Nowy Jork z Los Angeles sunie z prędkością 3200 kilometrów na godzinę. Wielkie kłęby waty stalowej zasilane za pomocą tego nowego tworzywa dostarczają czystą wodę pitną większości miast na świecie. Co tydzień można usłyszeć o jakichś nowych zastosowaniach.

Demokryt, który dotąd siedział cicho, zadał kluczowe pytanie.

DEMOKRYT: Dostrzeżliście coś wewnątrz kwarków?

MERCEDES [z *uśmiechem potrząsa głową*]: Napisałam na ten temat pracę doktorską. Najlepszy pomiar pochodzi z ostatniego eksperymentu przeprowadzonego przez nadprzewodzący superakcelerator. Promień kwarka jest mniejszy niż - aż trudno w to uwierzyć - 10^{-21} centymetra. O ile wiemy, nie istnieje lepsze przybliżenie punktu niż kwark czy lepton.

DEMOKRYT [*podskakuje, klaszcze i śmieje się histerycznie*]: *Atomos! Wreszcie!*

LEDERMAN: Jakież niespodzianki?

MERCEDES: No cóż, dysponując Susy i Higgsem, młody teoretyk z Uniwersytetu w Nowym Yorku - facet o nazwisku Pedro Monteagudo - odkrył nowe równanie supersymetrycznej wielkiej zunifikowanej teorii, które trafnie przewiduje masy wszystkich kwarków i leptonów, generowane przez Higgsa. W podobny sposób Bohr wyjaśnił poziomy energetyczne w atomie wodoru.

LEDERMAN: Naprawdę?

MERCEDES: Tak, równanie Monteagudo zastąpiło równanie Diraca, Schrödingera i wszystkich innych. Popatrz na moją koszulkę.

Nie trzeba było mi tego dwa razy powtarzać. Ale gdy próbowałem przyjrzeć się umieszczonemu tam dziwnemu hieroglificznemu napisowi, poczułem zawrót głowy i wszystko zniknęło.

■

Do diabła! Byłem z powrotem w domu. Zaspany uniosłem głowę znad papierów. Zauważyłem fotokopię notatki prasowej o tytule: PRYZNANIE FUNDUSZY NA BUDOWĘ NADPRZEWODZĄCEGO SUPERAKCELERATORA POD ZNAKIEM ZAPYTANIA. Mój modem popiskiwał, a pocztą komputerową nadeszło zaproszenie do Waszyngtonu na przesłuchania w Senacie w sprawie superakceleratora.

Do widzenia

Przeszliśmy razem długą drogę, drogi Kolego. Wyruszyliśmy z Miletu i wędrowaliśmy ścieżką nauki z „tam i wtedy” do „tu i teraz”. Niestety, przemknęliśmy obok wielu ciekawych, większych i mniejszych kamieni milowych, zatrzymaliśmy się natomiast w kilku innych miejscach: przy Newtonie i Faradayu, Daltonie i Rutherfordzie oraz, oczywiście, wpadliśmy na hamburgera do McDonalda. Dostrzegamy nowe związki między mikrokosmosem i makrokosmosem i jak kierowca na wijącej się wśród lasu drodze - od czasu do czasu widzimy w prześwitach wyniosły gmach zasłonięty przez drzewa i mgłą: budowlę wznoszoną przez dwa i pół tysiąca lat.

Drogę próbowałem ubarwić dość frywolnymi opowieściami o naukowcach. Trzeba umieć odróżniać naukowców od nauki. Naukowcy najczęściej są ludźmi i jako tacy stanowią bardzo różnorodną grupę. Ta różnorodność jest właśnie tym, co czyni ludzi tak

bardzo interesującymi. Bywają naukowcy łagodnego usposobienia i ambitni; uczeni kierują się ciekawością lub egoizmem; wykazują anielskie cnoty i niesłychaną chciwość; są mądrzy ponad wszelką miarę i dziecinni aż do infantylizmu; uczuciowi, ogarnięci obsesją, powściągliwi... W podzbiórce ludzkości, do którego należą naukowcy, znajdują się ateści, agnostycy oraz ludzie głęboko religijni, którzy uważają, że Stwórca jest osobowym Bogiem, wszechwiedzącym albo nieco zagubionym, jak Frank Morgan z *Czarnoksiężnika z krainy Oz*.

Rozpiętość zdolności wśród naukowców także jest ogromna. I dobrze, bo nauka potrzebuje zarówno wielkich architektów, jak i prostych wyrobników. Znajdują się wśród nas ludzie o potężnych umysłach, inni zaś są tylko niesłychanie bystrzy. Są tacy, którzy mają magiczne ręce, niesamowitą intuicję i tę najważniejszą ze wszystkich cech naukowca: szczęście. Mamy też durni, głabów i takich, którzy są po prostu głupi. Głupi!

- Masz na myśli: głupi w porównaniu z innymi - zaprotestowała kiedyś moja matka.
- Nie, mamo, zwyczajnie głupi.
- To w jaki sposób otrzymują doktoraty? - zaproponowała.
- *Sitzfleisch*, mammo.

Sitzfleisch to umiejętność wytrwania przy każdym zadaniu, powtarzania go od nowa w nieskończoność tak długo, aż wreszcie w jakiś sposób zostanie wykonane. Ci, którzy przyznają doktoraty, w końcu też są ludźmi i prędzej czy później się poddają.

Jeśli cokolwiek łączy to zbiorowisko ludzkie, które zwiemy naukowcami, to jest to duma i pieczołowitość, z jaką każdy z nas wnosi swój wkład w budowę gmachu nauki. Może to być jedna cegła starannie wpasowywana w odpowiednie miejsce albo wspiane nadproże (by w pełni wykorzystać metaforę) zwieńczające kolumny wzniesione przez wielkich mistrzów. Budujemy z zachwytem, ale i z dużą domieszką sceptycyzmu, kierując się tym, co zastaliśmy. Wnosimy całą naszą ludzką różnorodność, podchodzimy do tego zadania ze wszystkich stron, każdy z własnym bagażem kulturowym i językowym, ale w jakiś sposób natychmiast udaje nam się nawiązać nić porozumienia i wczuć w nastrój budowy Wieży Wiedzy.

Pora pozwolić Ci powrócić do Twych zwykłych zajęć. Przez trzy lata marzyłem o tej chwili. Teraz muszę przyznać, że będzie mi Cię brakowało, Kolego Czytelniku. Byłeś lub byłaś moim wiernym kompanem podczas podróży i podczas cichych nocnych sesji piarskich. Wyobrażałem sobie Ciebie jako emerytowaną nauczycielkę historii, bukmachera, studenta, sprzedawcę win, mechanika samochodowego, maturzystę, a gdy potrzebowałem pocieszenia - jako niewiarygodnie piękną dziewczynę, która pragnie mnie objąć. Będzie mi Cię brakowało. Czuję się podobnie jak czytelnik, który kończąc powieść, niechętnie rozstaje się z bohaterami.

Koniec fizyki?

Zanim odejdę, muszę złożyć oświadczenie w sprawie tej historii z koszulkami. Mogłem wywołać wrażenie, że Boska Cząstka, gdy ją wreszcie znajdziemy, będzie ostatecznym objawieniem tego, jak działa Wszechświat. To jest domena prawdziwie-głębokich-myślicieli, teoretyków cząstek elementarnych, którym płacą właśnie za to, by myśleli naprawdę głęboko. Niektórzy sądzą, że zakończy się wtedy Droga Redukcjonizmu; że w zasadzie będziemy wiedzieli wszystko. Wtedy nauka skoncentruje się na złożoności:

wirusy, poranne korki na drogach, lek przeciw nienawiści i przemocy... wszystkie te wspaniałe rzeczy.

Panuje także inny pogląd - że jesteśmy jak dzieci (według metafory Bentleya Grasa) bawiące się nad brzegiem oceanu. Ten pogląd dopuszcza możliwość istnienia prawdziwie nieskończonego frontu badań. Boska Cząstka odsłania świat wspaniałego i oślepiającego piękna, ale takiego, do którego oczy naszego umysłu zdołają się przyzwyczaić. Wkrótce dostrzeżemy, że nie znamy wszystkich odpowiedzi. Co jest w środku elektronu, kwarka i czarnej dziury? Poszukiwania odpowiedzi na te pytania zawsze będą popychały nas naprzód.

Osobiście przychylam się raczej do opinii optymistów (a może są to pesymiści, skoro zakładają, że niebawem stracą posady?) - tych teoretyków, którzy wierzą, że będziemy „wiedzieć wszystko”. Ale eksperymentator siedzący we mnie nie pozwala mi na zaakceptowanie tak wielkiej arogancji. Przy rozciągającej się przed nami eksperymentalnej drodze do krainy Oz, do masy Plancka, do tej epoki, która skończyła się 10^{-40} sekundy po narodzinach Wszechświata, nasza podróż z Miletu do Waxahachie wygląda jak majówka. Myślę nie tylko o akceleratorach opasujących Układ Słoneczny i odpowiednich do ich rozmiarów gmachach detektorów, nie tylko o miliardach i miliardach godzin snu, które tracą moi studenci i ich studenci, ale martwię się o konieczny optymizm, na który musi się zdobyć nasze społeczeństwo, jeśli ta misja ma być kontynuowana.

To, co teraz już dobrze wiemy i co jeszcze lepiej poznamy w ciągu najbliższej dekady, można zmierzyć energią nadprzewodzącego superakceleratora - 40 bilionów woltów. Ale rzeczy istotne muszą się dziać przy energiach tak wielkich, że zderzenia osiągnane w przyszłości w SSC będą się wydawać niewinną igraszką. Wciąż istnieją nieograniczone wprost możliwości natknięcia się na zupełne niespodzianki. Możemy jeszcze znaleźć we wnętrzu kwarków starożytne cywilizacje poddane nowym prawom przyrody, tak dla nas dziś niewyobrażalnym, jak teoria kwantowa (czy cezowe zegary atomowe) byłyby dla Galileusza. Psst! Zanim przyjadą faceci w białych fartuchach, chciałbym wspomnieć o jeszcze jednym, często poruszonym zagadnieniu.

Zaskakujące jest, jak często rozsądni skądinąd naukowcy zapominają lekcję historii, a mianowicie, że największy wpływ na społeczeństwo wywierają zawsze wyniki tych badań, których celem jest poszukiwanie a-tomu. Niczego nie ujmując inżynierii genetycznej, materiałoznawstwu czy reakcjom termojądrowym, nakłady na poszukiwania a-tomu zwróciły się milionkrotnie. Inwestowanie w abstrakcyjne badania - na poziomie mniejszym niż jeden procent budżetu państw uprzemysłowionych! - przez ponad trzysta lat przynosiło o wiele większe zyski niż przeciętne notowania Dow Jonesa.¹ Mimo to od czasu do czasu terroryzują nas sfrustrowani politycy, którzy domagają się, by nauka skupiła się na bardziej pilnych potrzebach społeczeństwa, zapominając - a, być może, nigdy nie rozumiejąc - że większość istotnych zdobyczy technicznych, które wpłynęły na jakość oraz długość ludzkiego życia pochodzi z czystych, abstrakcyjnych i napędzanych ciekawością badań. Amen.

Obowiązkowe boskie zakończenie

¹ Amerykański wskaźnik giełdowy (przyp. red.).

Poszukując pomysłu na zakończenie tego wykładu, przestudiowałem zakończenia kilkunastu publikacji popularnonaukowych adresowanych do szerokiego kręgu odbiorców. Są one zawsze filozoficzne i zawsze pojawia się w nich Stwórca przyjmujący ulubioną dla autora postać albo postać ulubioną dla ulubionego autora danego autora. Zauważyłem, że w książkach popularnonaukowych występują dwa rodzaje zakończeń. Pierwszy charakteryzuje się pokorą. Pomniejszanie znaczenia rodzaju ludzkiego zazwyczaj zaczyna się od przypomnienia czytelnikowi, że już wielokrotnie bywaliśmy usuwani z centrum: nasza planeta nie jest środkiem Układu Słonecznego, Układ Słoneczny nie leży w środku naszej Galaktyki, a nasza Galaktyka nie wyróżnia się niczym szczególnym spośród innych galaktyk. Jeśli to nie wystarczy, by zniechęcić nawet najbardziej pewnych siebie osobników, dowiadujemy się, że również tworzywo, z którego my sami i wszystko wokół nas jest zrobione, składa się tylko z niewielkiej próbki elementarnych obiektów składających się na Wszechświat. Następnie autorzy tego typu podsumowań stwierdzają, że rodzaj ludzki, jego osiągnięcia i pomniki nie odgrywają praktycznie żadnej istotnej roli w ewolucji kosmosu. Mistrzem takiej przepelnionej skromnością oceny jest Bertrand Russell:

„Taki w zarysie, choć jeszcze bardziej pozbawiony celu i znaczenia, jest świat, w który Nauka każe nam wierzyć. Pośród tego świata, jeśli w ogóle gdziekolwiek, nasze ideały muszą sobie znaleźć schronienie. To, że człowiek jest wytworem przypadków, z którymi nie wiąże się żadna wizja końca; że jego pochodzenie, rozwój, nadzieje i lęki, jego uczucia i wierzenia są zaledwie wynikiem przypadkowych zderzeń atomów; że ani ogień, ani bohaterstwo, ani bogactwo myśli i uczuć nie zachowają życia po śmierci; że przeznaczeniem wysiłków wszystkich wieków, całego poświęcenia, wszystkich natchnień i olśnień ludzkiego geniuszu jest zagłada wraz ze śmiercią Układu Słonecznego; że cała ta świątynia ludzkich osiągnięć musi nieodwołalnie zostać pogrzebana pod szczątkami Wszechświata - wszystko to, jeśli nawet nie jest bezdyskusyjne, jest niemal tak pewne, że żadna filozofia, która to odrzuca, nie może się utrzymać. Tylko odwołując się do tych prawd, tylko na mocnym fundamencie rozpaczy można bezpiecznie zbudować mieszkanie duszy.

Krótkie i bezsilne jest życie Człowieka, na niego i całą jego rasę spada powoli i w sposób nieunikniony wyrok bezlitosny i ciemny...”

Na co ja tylko odpowiadam cicho:

- Ach! Coś w tym jest.

Steven Weinberg wyraził to zwięźle: „Im bardziej Wszechświat wydaje się zrozumiałe, tym bardziej sprawia wrażenie bezcelowego”. Teraz już z pewnością nie uwolnimy się od uczucia upokorzenia.

Są także i tacy, którzy zwracają się w zupełnie przeciwnym kierunku. To ci, dla których próby zrozumienia Wszechświata nie są wcale doświadczeniem uczącym pokory, ale powodem do głoszenia swej chwały. Ta grupa pragnie „zrozumieć umysł Boga” i mówi, że poznając stajemy się istotną częścią całego procesu. Do głębi poruszeni, wracamy na należne nam miejsce w centrum Wszechświata. Niektórzy filozofowie tego rodzaju posuwają się nawet do stwierdzenia, że cały Wszechświat jest wytworem ludzkiego umysłu. Inni, nieco skromniejsi, mówią, że samo istnienie naszego umysłu, nawet na nieskończenie małej, nic nie znaczącej, zwykłej planecie musi być istotną częścią Wielkiego Planu. Na co ja odpowiadam, zupełnie cichutko, że miło jest być potrzebnym.

Wolę jednak mieszaninę tych dwóch ujęć i jeśli mamy tu gdzieś znaleźć miejsce dla Bogini, skorzystajmy z pomocy ludzi, którzy podarowali nam tak wiele niezapomnianych

Jej obrazów. Oto szkic końcowej sceny błyskotliwej hollywoodzkiej transmutacji tego wykładu.

■

Bohater jest prezesem Towarzystwa Astrofizycznego, trzykrotnym laureatem Nagrody Nobla. Stoi w nocy na plaży, szeroko rozstawione nogi mocno wbił w piasek. Potrząsa pięścią w kierunku wygwieżdżonej czerni nieba. Namaszczony swym człowieczeństwem, świadom najpotężniejszych osiągnięć ludzkości woła do Wszechświata, przekrzykując łoskot rozbijających się fal: „Stworzyłem cię. Jesteś wytworem mojego umysłu - moją wizją i moim wynalazkiem. To ja daję ci przyczynę, cel i piękno. Po cóż innego byś miał istnieć, jeśli nie dla mojej świadomości i mego rozumowania, w którym się ujawniasz?”

Na niebie pojawia się niewyraźna wirująca jasność i świetlisty promień oświetla naszego człowieka-na-plaży. Przy akompaniamencie wzniosłych akordów *Mszy h-moll* Bacha albo partii solowej na piccolo ze *Święta wiosny* Strawińskiego światło na niebie z wolna układa się w obraz Jej twarzy - uśmiechniętej, lecz z wyrazem nieskończonego, pełnego słodczy smutku.

Obraz znika. Ciemność. Lista płac.