

Znakomite wprowadzenie w dziwny świat kwantów - niezbędny element zrozumienia otaczającej rzeczywistości. Teoria kwantowa jest tak szokująca, że sam Einstein nie potrafił jej zaakceptować, i tak ważna, że stanowi podstawę całej współczesnej nauki. Bez tej teorii nie mielibyśmy ani komputerów, ani biologii molekularnej, ani odkrycia DNA, ani inżynierii genetycznej. W *poszukiwaniu kota Schrödingera* to opowieść o mechanice kwantowej - prawdziwa historia, choć dziwniejsza niż niejedna bajka. Autor prowadzi nas, krok po kroku, przez ten fascynujący świat, a jedyne, czego oczekuje od czytelnika, to otwarty umysł. Przedstawia naukowców, którzy stworzyli teorię kwantową, opisuje atom, promieniowanie, podróże w czasie, powstanie wszechświata, nadprzewodnictwo i zagadkę życia. W świecie pełnym cudownych zjawisk, tajemnic i niespodzianek szukając kwantowej rzeczywistości - kota Schrödingera - pomaga czytelnikowi poznać najważniejszą dziedzinę współczesnej nauki - fizykę kwantową.

W poszukiwaniu kota Schrödingera

John Gribbin

**W poszukiwaniu kota
Schrödingera**

Realizm w fizyce kwantowej

Przekład Jacek Bieroń

Tytuł oryginału *In Search of Schrödinger's Cat. Quantum Physics Reality*

Konsultacja merytoryczna

prof. dr hab. Wojciech Gawlik

Uniwersytet Jagielloński w Krakowie

Nie podoba mi się to i żałuję, że kiedykolwiek miałem z tym do czynienia.

ERWIN SCHRÖDINGER
1887-1961

Nic nie jest realne.

JOHN LENNON
1940-1980

Spis treści

Podziękowania

Wstęp

Prolog. Nic nie jest rzeczywiste

CZĘŚĆ PIERWSZA **KWANT**

Rozdział pierwszy: **Światło**

Fale czy cząstki?

Triumf teorii falowej

Rozdział drugi: **Atomy**

Atomy dziewiętnastowieczne

Atomy Einsteina

Elektrony

Jony

Promienie X

Radioaktywność

Wnętrze atomu

Rozdział trzeci: **Światło i atom**

Zagadka ciała doskonale czarnego

Niechciana rewolucja

Co to jest *h*

Einstein, światło i kwanty

Rozdział czwarty: **Atom Bohra**

Skaczące elektrony

Wodór wyjaśniony

Rola przypadku. Czy Bóg gra w kości?

Atomy w perspektywie

Chemia wyjaśniona

CZĘŚĆ DRUGA **MECHANIKA KWANTOWA**

Rozdział piąty: **Fotony i elektrony**

Cząstki światła

Dualizm falowo-korpuskularny

Fale elektronowe

Rozstanie z przeszłością

Zakaz Pauliego

Co dalej?

Rozdział szósty: **Macierze i fale**

Odkrycie na wyspie Heligoland

Matematyka kwantowa
Teoria Schrödingera
Krok wstecz
Kwantowa książka kucharska
Rozdział siódmy: **Kuchnia kwantowa**
Antymateria
Wnętrze jądra
Lasery i masery
Potężny mikro
Nadprzewodniki
Życie
CZĘŚĆ TRZECIA I DALEJ
Rozdział ósmy: **Przypadek i prawdopodobieństwo**
Sens nieoznaczoności
Interpretacja kopenhaska
Eksperyment z dwiema szczelinami
Kolaps funkcji falowej
Reguły komplementarności
Rozdział dziewiąty: **Paradoksy i możliwości**
Zegar w pudle
Paradoks EPR
Podróże w czasie
Czas u Einsteina
Coś za nic
Kot Schrödingera
Wszechświat współuczestniczący
Rozdział dziesiąty: **Koronny dowód**
Paradoks spinu
Zagadka polaryzacji
Test Bella
Dowód
Co to oznacza?
Potwierdzenia i zastosowania
Rozdział jedenasty: **Wiele światów**
Kto obserwuje obserwatorów
Koty Schrödingera
Poza fantastyką
Poza Einsteinem

Drugie spojrzenie
Poza Everettem
Nasze specjalne miejsce
Epilog: Nie dokończone sprawy
Skręcona czasoprzestrzeń
Złamana symetria
Supergravitacja
Czy wszechświat jest fluktuacją próżni
Inflacja i wszechświat
Bibliografia

Podziękowania

Moja znajomość z teorią kwantów zaczęła się ponad dwadzieścia lat temu w szkole, gdy odkryłem, jak model powłokowy w magiczny sposób wyjaśnia strukturę tablicy okresowej pierwiastków oraz wszystko to, z czym zmagalem się na nudnych lekcjach chemii. Zachęcony tym, sięgnąłem po książki jakoby „zbyt trudne” i natychmiast zrozumiałem, w jak piękny i prosty sposób teoria kwantowa objaśnia widma atomowe. Po raz pierwszy w życiu przeżyłem fascynację faktem, że to, co najlepsze w nauce, jest zarówno piękne, jak i proste. Ten fakt jest przez wielu nauczycieli świadomie lub nieświadomie ukrywany przed uczniami. Czułem się jak bohater książki C.P. Snowa *Zrywam z nauką* - przeczytałem ją zresztą znacznie później - a który odkrywa to samo co ja:

Zobaczyłem, jak kolekcja przypadkowych faktów ustawia się w logiczną całość... „Ależ to piękne - rzekłem do siebie. - Bardzo piękne. I prawdziwe¹ .

Między innymi dlatego zdecydowałem się studiować fizykę na University of Sussex w Brighton. Jednakże wykłady uniwersyteckie mają tę właściwość, że piękno i prostota praw fizyki jest przytłoczona przez ogromną liczbę szczegółów i matematycznych narzędzi przeznaczonych do rozwiązywania poszczególnych problemów za pomocą równań mechaniki kwantowej, co wydaje się równie odległe i obce pięknu oraz prostocie, jak pilotowanie Boeinga ma się do latania lotnią. Aczkolwiek ta pierwsza fascynacja mechaniką kwantową wywarła silny wpływ na przebieg mojej kariery zawodowej, to przez długi czas pozostawałem poza światem kwantów, bobrując w innych dziedzinach nauki.

Powróciłem do tych młodzieńczych zainteresowań wskutek swego rodzaju zbiegu okoliczności. W późnych latach siedemdziesiątych i w początkach lat osiemdziesiątych zaczęły się pojawiać książki i artykuły z mniejszym lub większym powodzeniem popularyzujące dziwny świat kwantów. Niektóre z nich były tak skandalicznie odległe od prawdy, że nie umiałem sobie wyobrazić, w jaki sposób ich lektura mogłaby przybliżyć czytelnikowi piękno i prostotę nauki. Zacząłem rozmyślać o uporządkowaniu tego. W tym samym czasie przeprowadzono serię eksperymentów, w których potwierdzono niektóre z najdziwniejszych właściwości mechaniki kwantowej. Wiadomości o tych odkryciach zapędziły mnie z powrotem do biblioteki, dla odświeżenia znajomości z tymi osobliwościami. W końcu w któreś święta Bożego Narodzenia zostałem zaproszony do studia BBC, aby wystąpić w charakterze naukowej przeciwwagi dla Malcolma Muggeridge'a, który właśnie przeszedł na wiarę katolicką i był głównym bohaterem programu. Sławny nawrócony powiedział swoje, podkreślając tajemnice objawienia, a następnie zwrócił się do mnie i rzekł: „Oto mamy przed sobą człowieka, który zna odpowiedzi na wszystkie pytania, a w każdym razie twierdzi, że je zna”. W krótkim czasie, jaki mi pozostał, próbowałem udzielić odpowiedzi w tym samym tonie, zwracając uwagę, że nauka n i e twierdzi, iż zna wszystkie odpowiedzi, i że to właśnie religia, a nie nauka, opiera się na absolutnej wierze i przekonaniu, że prawda jest znana.

¹ C.P. Snów, *Zrywam z nauką*, przeł. Mieczysław Jarosławski, Wyd. Trzaska, Evert i Michalski, Warszawa 1937.

„Ja w nic nie wierzę” - powiedziałem, i właśnie miałem zamiar rozwinąć to stwierdzenie, gdy nagranie dobiegło końca. Przez cały karnawał byłem witany przez przyjaciół i znajomych tymi właśnie słowami i spędziłem wiele godzin, tłumacząc, że brak absolutnej wiary nie przeszkadza mi bynajmniej prowadzić normalnego życia, gdyż wystarczy robocza hipoteza, że Słońce nie zgaśnie z dnia na dzień. W toku podobnych dyskusji krystalizowały się moje poglądy o realności - lub nierealności - świata kwantów. Stopniowo doszedłem do przekonania, że mógłbym napisać o tym książkę. W trakcie pisania testowałem niektóre z bardziej subtelnych argumentów w ramach mojego regularnego udziału w programie radiowym prowadzonym przez Tomy'ego Vance'a, i nadawanym przez British Forces Broadcasting Service². Dociekliwe pytania Toma ujawniły wiele niedostatków w moich wywodach i pomogły mi lepiej przedstawić moje idee. Głównym źródłem literatury potrzebnej do przygotowania niniejszej książki była biblioteka Uniwersytetu Sussex, która zapewne posiada jeden z najlepszych zbiorów dzieł o teorii kwantowej. Wiele z mniej znanych pozycji odszukała dla mnie Mandy Caplin, z czasopisma „New Scientist”, która umie przekonująco posługiwać się teleksem. Christine Sutton sprostowała niektóre z moich błędnych przekonań z dziedziny cząstek elementarnych i teorii pola. Moja żona nie tylko zapewniła wsparcie w postaci badań bibliograficznych i organizacji materiału, ale także wygładziła w moim tekście wiele ostrych kantów. Jestem wdzięczny profesorowi Rudolfowi Peierlsowi za jego gotowość do wyjaśniania mi szczególnie niektórych subtelności związanych z eksperymentem „zegar w pudle” oraz z paradoksem EPR.

Zatem wszelkie pochwały pod adresem tej książki powinny być skierowane do: autorów „zbyt trudnych” książek, których tytułów już nie pamiętam, a które znalazłem w bibliotece hrabstwa Kent, mając lat szesnaście; do niewprawnych „popularyzatorów” i głosicieli idei kwantowych, którzy przekonali mnie, że mogę to zrobić lepiej; do Malcolma Muggeridge'a i BBC; do biblioteki Uniwersytetu Sussex; do Tomy'ego Vance'a wraz z British Forces Broadcasting Service; do Mandy Caplin i Christine Sutton; i do Min. Wszelkie uwagi krytyczne powinny być kierowane oczywiście do mnie.

lipiec 1983
JOHN GRIBBIN

² British Forces Broadcasting Service - Radio Brytyjskich Sił Zbrojnych (przyp. tłum.).

Wstęp

Gdyby wszystkie książki i publikacje popularyzujące teorię względności ustawić jedna na drugiej, prawdopodobnie sięgnęłyby od Ziemi do Księżyca. „Każdy wie”, że teoria względności Einsteina jest największym osiągnięciem dwudziestowiecznej nauki i „każdy” jest w błędzie. Natomiast gdyby wszystkie książki i publikacje popularyzujące teorię kwantową położyć jedna obok drugiej, być może przykryłyby moje biurko. Nie znaczy to bynajmniej, że nikt poza kręgami akademickimi nie słyszał o teorii kwantowej. W rzeczy samej jest ona bardzo popularna w niektórych gronach i wykorzystywana do wyjaśniania takich zjawisk jak telepatia czy wyginanie łyżeczek na odległość. Jest również bogatym źródłem pomysłów dla wielu autorów literatury fantastycznonaukowej. Jest także niekiedy identyfikowana z wierzeniami okultystycznymi oraz ze spostrzeganiem pozazmysłowym - dziedzinami wiedzy, których nikt nie rozumie i z których nie ma żadnego pożytku.

Niniejsza książka została napisana po to, aby rozwiać uprzedzenia wobec najważniejszej i najbardziej fundamentalnej dziedziny współczesnej nauki. Książka zawdzięcza swe istnienie swoistemu zbiegowi okoliczności, który zdarzył się w lecie 1982 roku. Po pierwsze, skończyłem właśnie pisać inną książkę, *Spacewarps* [Fałdy przestrzeni], i uznałem, że warto byłoby także spróbować demystyfikacji drugiej fundamentalnej dziedziny dwudziestowiecznej nauki. Po drugie, coraz bardziej irytowały mnie nieporozumienia narastające wokół teorii kwantowej. Znakomita książka Fritjofa Capry, *Tao fizyki*, znalazła wielu naśladowców, którzy nie rozumieli ani fizyki, ani tao, ale wyczuli, że na połączeniu zachodniej nauki z filozofią Wschodu można zarobić. Po trzecie, w sierpniu 1982 roku nadeszły wieści z Paryża, gdzie udało się wykonać kluczowy eksperyment potwierdzający słuszność jednego z podstawowych założeń mechaniki kwantowej.

Czytelnik nie znajdzie w tej książce „wschodniego mistycyzmu”, łamania łyżeczek ani pozazmysłowego spostrzegania. Znajdzie prawdę o mechanice kwantowej, prawdę daleko dziwniejszą niż jakakolwiek fikcja. Współczesna nauka jest sama w sobie pełna cudownych zjawisk, tajemnic i niespodzianek, toteż nie musi się stroić w znoszone fatałaszkę obcych filozofii. Próbując odpowiedzieć na pytanie „Co jest rzeczywiste?”, nauka udziela zaskakującej odpowiedzi. Czytelnik może nie dać wiary tej odpowiedzi, ale zorientuje się, jak współczesna nauka widzi świat.

Prolog

Nic nie jest rzeczywiste

Tytułowy kot jest oczywiście istotą fikcyjną. Jednak Erwin Schrödinger był istotą z krwi i kości, austriackim naukowcem, jednym z twórców dziedziny fizyki, zwanej obecnie mechaniką kwantową. „Dziedzina fizyki” to określenie mało adekwatne, ponieważ mechanika kwantowa jest fundamentem całej współczesnej nauki. Równania mechaniki kwantowej opisują zachowanie bardzo małych obiektów - atomów lub jeszcze mniejszych. Co więcej, tylko równania mechaniki kwantowej mogą poprawnie opisać świat bardzo małych obiektów. Bez tych równań fizycy nie potrafiliby zaprojektować elektrowni (lub bomby) atomowej, lasera ani wyjaśnić, dlaczego Słońce świeci. Bez tych równań chemia znajdowałaby się wciąż na poziomie średniowiecza, nie byłoby ani biologii molekularnej, ani odkrycia struktury DNA, ani inżynierii genetycznej.

Teoria kwantowa jest największym osiągnięciem nauki, daleko istotniejszym i o daleko ważniejszych praktycznych konsekwencjach niż teoria względności. Jednakże świat kwantów jest tak dziwny, że nawet Albert Einstein nie zaakceptował niektórych przewidywań teorii stworzonej przez Schrödingera i jego kolegów. Einstein, podobnie jak wielu innych uczonych, wołał przyjąć, że równania mechaniki kwantowej stanowią jedynie pewnego rodzaju matematyczny chwyt, który wprawdzie doskonale się nadaje do opisu atomowych i subatomowych cząstek, ale w istocie ukrywa jakąś głębszą prawdę, która jest bardziej zbliżona do naszego codziennego poczucia rzeczywistości. Rzeczywiście mechanika kwantowa mówi, że nic nie jest rzeczywiste i nie zdołamy powiedzieć, co cząstka robi, jeśli na nią nie patrzymy. Kot Schrödingera został stworzony po to, aby uzmysłowić różnicę między naszym wyobrażeniem o świecie a światem kwantów.

W świecie kwantów nie działają prawa fizyki znane z codziennego doświadczenia. Zdarzeniami rządzą prawdopodobieństwa. Radioaktywny atom może się rozpaść, emitując, powiedzmy, elektron, ale równie dobrze może pozostać radioaktywny. Można skonstruować eksperyment, w którym jeden z atomów w radioaktywnej próbce ma pięćdziesiąt procent szans na rozpad w pewnym przedziale czasowym, a odpowiednio ustawiony detektor zarejestruje ten fakt. Schrödinger, podobnie jak Einstein niezadowolony z konsekwencji stworzonej przez siebie teorii, próbował ukazać absurdalność tych konsekwencji, wymyślając eksperyment, w którym detektor jest sprzężony z fiolką zawierającą truciznę, a cała aparatura zamknięta w pokoju lub w pudle, wraz z żywym kotem. Detektor jest tak ustawiony, że rozpad atomu powoduje rozbicie fiołki, a uwolniona w ten sposób trucizna zabija kota. Nasze codzienne doświadczenie mówi nam, że kot ma pięćdziesiąt procent szans na przeżycie i bez zagląдания do pudła możemy spokojnie powiedzieć, że kot jest albo żywy, albo martwy. I tu natrafiamy na dziwne właściwości świata kwantów. Zgodnie z teorią kwantową α d n a z dwóch możliwości nie jest realna, dopóki nie zostanie zaobserwowana. Radioaktywny rozpad ani się zdarzył, ani się nie zdarzył, kot nie jest ani żywy, ani martwy, dopóki nie zajrzemy do środka i nie zobaczymy, co się stało. Teoretycy

akceptujący ortodoksyjną wersję mechaniki kwantowej mówią, że kot znajduje się w pewnym nieokreślonym stanie, ani martwym, ani żywym, tak długo, aż obserwator zajrzy do pudła i sprawdzi, co się dzieje. Nic nie jest rzeczywiste, dopóki nie zostanie zaobserwowane.

Takie rozwiązanie było nie do przyjęcia dla Einsteina, i nie tylko dla niego. „Bóg nie gra w kości” - to znane powiedzenie jest wyrazem protestu przeciwko teorii, według której światem rządzą zasadniczo „losowe” prawdopodobieństwa zdarzeń na poziomie kwantowym. Einstein odrzucił nierzeczywisty stan kota Schrödingera, zakładając, że musi istnieć ukryty „mechanizm”, który nadaje światu realność, i spędził wiele lat, próbując projektować testy, które mogłyby ujawnić ten mechanizm, ale zmarł, zanim przeprowadzenie takiego eksperymentu było możliwe. Być może to dobrze, że nie dożył chwili, w której mógłby zobaczyć rezultat.

W lecie 1982 roku na uniwersytecie paryskim zespół kierowany przez Alaina Aspecta wykonał serię eksperymentów opracowanych w celu wykrycia rzeczywistości - nazwanej teorią ukrytych parametrów - w nierzeczywistym świecie kwantów. Badano zachowanie dwóch cząstek światła - fotonów - biegnących z jednego źródła w przeciwnych kierunkach. Pełny opis eksperymentu znajduje się w rozdziale dziesiątym. W swojej istocie jest on testem rzeczywistości. Dwa fotony są obserwowane przez detektory, które mierzą pewną własność światła, zwaną polaryzacją. Zgodnie z teorią kwantową ta własność nie jest określona, dopóki nie zostanie zmierzona. Zgodnie z teorią ukrytych parametrów każdy foton ma określoną polaryzację już w momencie, gdy zostaje wytworzony. Ponieważ oba fotony są wysyłane równocześnie, ich polaryzacje są wzajemnie skorelowane. Jednak każda z teorii przewiduje innego rodzaju korelację.

Wyniki tego kluczowego eksperymentu nie pozostawiają żadnych wątpliwości. Polaryzacje fotonów są skorelowane dokładnie tak, jak przewiduje mechanika kwantowa. Co więcej, akt pomiaru polaryzacji jednego fotonu wywiera natychmiastowy wpływ na drugi foton, zmieniając jego stan, co również zakłada mechanika kwantowa. Dwa fotony łączy pewnego rodzaju oddziaływanie, mimo że oddalają się one od siebie z prędkością światła, a teoria względności mówi nam, że żaden sygnał nie może biec szybciej niż światło. Wynik eksperymentu dowodzi, że nie istnieje ukryta rzeczywistość, i że myślenie o fundamentalnych cząstkach, z których zbudowany jest świat, w kategoriach potocznie rozumianego „realizmu”, zawodzi. Cząstki te wydają się nierozdzielnie związane w jakąś niewidoczną całość, i każda z nich wie, co się dzieje z drugą.

Poszukiwanie kota Schrödingera było poszukiwaniem kwantowej rzeczywistości. Z tego krótkiego wstępu mogłoby się wydawać, że owo poszukiwanie na nic się zdało, bo nie istnieje rzeczywistość w potocznym znaczeniu tego słowa. Historia kota Schrödingera na tym się jednak nie kończy. Może ona nas doprowadzić do nowego znaczenia rzeczywistości, które przekracza, i zarazem zawiera w sobie, konwencjonalną interpretację mechaniki kwantowej, a zaczyna się od człowieka, który prawdopodobnie byłby jeszcze bardziej wstrząśnięty niż Einstein, gdyby mógł poznać odpowiedzi na pytania, które sobie zadawał. Izaak Newton, badając trzy stulecia temu naturę światła, nie wiedział, że znajduje się na tropie kota Schrödingera.

CZĘŚĆ PIERWSZA

KWANT

Jeśli ktoś nie jest zaszokowany teorią kwantów,
to jej nie rozumie.

NIELS BOHR 1885-1962

Rozdział pierwszy

Światło

Cała nauka opiera się na fizyce, a fizykę wynalazł Izaak Newton. Oczywiście korzystał z prac innych badaczy, ale dopiero publikacja jego trzech praw ruchu oraz teorii grawitacji, niemal trzysta lat temu, skierowała naukę na drogę, którą dotarła do lotów kosmicznych, laserów, energii atomowej, inżynierii genetycznej, chemii i całej reszty. Przez dwieście lat fizyka newtonowska (zwana obecnie fizyką klasyczną) królowała niepodzielnie, aż do dwudziestego wieku, którego rewolucyjne odkrycia pozwoliły fizyce odejść daleko od tezy Newtona. Jednak bez owych dwustu lat naukowego postępu zapewne nie byłoby nowych odkryć. Ta książka nie ma być historią ani całej nauki, ani fizyki klasycznej, lecz historią nowoczesnej, kwantowej teorii materii. Już w pracach Newtona sprzed trzystu lat pojawiły się pierwsze oznaki przyszłych zmian, aczkolwiek nie w sławnym dziele o prawach ruchu ani w studiach nad ruchami planet i ich orbitami, lecz w badaniach natury światła.

Wyobrażenia Newtona na temat natury światła ukształtowały się w dużej mierze pod wpływem jego odkryć związanych z ruchem planet i innych makroskopowych ciał. Newton zdawał sobie sprawę, że nasze codzienne doświadczenie może być mylące i że ciało nie poddane oddziaływaniom zewnętrznym musi zachowywać się inaczej niż to samo ciało znajdujące się na powierzchni Ziemi. Codzienne doświadczenie mówi nam, że przedmioty pozostawione samym sobie mają skłonność do pozostania w miejscu. Poruszają się pod wpływem siły, ale gdy siła zniknie, wkrótce się zatrzymują. Dlaczego zatem planety się nie zatrzymują? Czy coś je popycha? W żadnym razie. To planety w przestrzeni kosmicznej nie są poddane zewnętrznym wpływom, a obiektom na powierzchni Ziemi coś przeszkadza. Jeśli próbuję popchnąć talerz po stole, tarcie talerza o płaszczyznę stołu przeciwstawia się mojej sile i talerz zatrzyma się, gdy tylko przestanę go popychać. Gdyby nie było tarcia, talerz poruszałby się nadal. To jest treść pierwszego prawa Newtona: każde ciało stoi w miejscu albo porusza się ze stałą prędkością, jeżeli nie działają na nie żadne zewnętrzne siły. Drugie prawo określa, jaki efekt wywiera siła działająca na dane ciało. Zewnętrzna siła działająca na ciało zmienia jego prędkość. Zmiana prędkości nazywa się przyspieszeniem. Jeśli wielkość siły podzielić przez masę ciała, na które ta siła oddziałuje, to w

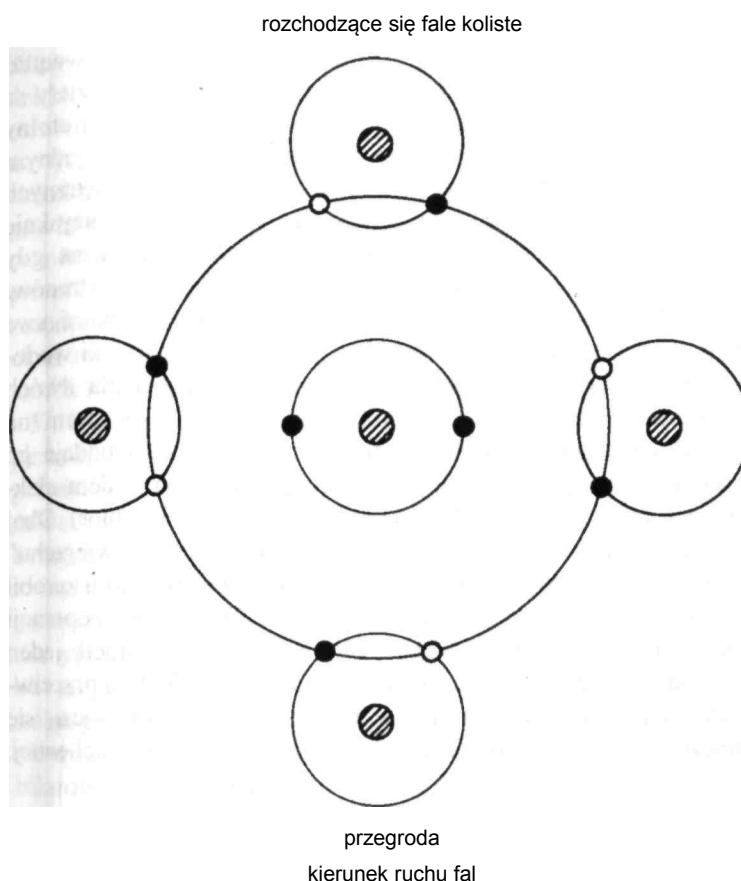
wyniku dostaje się właśnie przyspieszenie, z jakim porusza się to ciało pod wpływem działania siły. W skrócie drugie prawo można wyrazić następująco: siła równa się masa razy przyspieszenie. Trzecie prawo Newtona mówi, jak ciało reaguje na działającą na niego siłę: każdej akcji odpowiada równa i przeciwnie skierowana reakcja. Jeśli uderzę piłkę tenisową rakieta, to siła, z jaką rakieta działa na piłkę, jest dokładnie równa sile, z jaką piłka działa - w przeciwnym kierunku - na rakieta. Na talerz stojący na stole działa siła ciężkości skierowana w dół oraz dokładnie równa co do wielkości, lecz skierowana w górę siła reakcji stołu. Siła, z jaką gaz jest wypychany z komory spalania rakiety, odpowiada przeciwnie skierowana siła odrzutu, popychająca rakieta w przeciwną stronę.

Te trzy prawa, łącznie z prawem grawitacji, wyjaśniają ruch planet wokół Słońca oraz Księżyca wokół Ziemi. Jeśli uwzględni się tarcie, to wyjaśniają one równie dobrze ruch ciał na powierzchni Ziemi i tym samym stanowią podstawę mechaniki klasycznej, której złoty wiek przypadł na ubiegłe stulecie. Jednak prawa te mają też zadziwiające konsekwencje filozoficzne. Zachowanie ciała może być dokładnie określone na podstawie znajomości sił działających na to ciało w wyniku jego oddziaływań z innymi ciałami. Gdyby było możliwe poznanie położenia i prędkości wszystkich cząstek we wszechświecie, to na podstawie praw Newtona można byłoby poznać z dowolną dokładnością przyszłość każdej cząstki, a zatem także i przyszłość wszechświata. Czy to znaczy, że wszechświat funkcjonuje jak nakręcony przez Stwórcę zegar puszczony w ruch po zaplanowanej trajektorii? Mechanika klasyczna Newtona stanowi bardzo silny argument za tak rozumianym deterministycznym punktem widzenia, który niewiele miejsca pozostawia dla ludzkiej wolnej woli lub dla przypadku. Czy rzeczywiście jesteśmy tylko marionetkami poruszającymi się po z góry ustalonej ścieżce życia, bez żadnej możliwości wyboru? Większość naukowców była skłonna zostawić to pytanie filozofom, aż do czasu, gdy wróciło ono z całą mocą wraz z nową fizyką dwudziestego stulecia.

Fale czy cząstki?

Trudno się dziwić, że po sukcesie teorii opisującej ruch ciał materialnych Newton próbował wyjaśnić na gruncie tej samej teorii własności światła. W końcu promienie światła tworzą linie proste, a sposób, w jaki światło odbija się od lustra, jest bardzo podobny do odbicia kuli od sztywnej ściany. Newton zbudował pierwszy teleskop refrakcyjny, wyjaśnił, w jaki sposób białe światło jest złożone z kolorów tęczy i dokonał wielu innych odkryć w optyce, ale wszystkie jego teorie opierały się na założeniu, że światło składa się ze strumienia maleńkich cząstek, zwanych korpuskułami. Promień światła ugina się, gdy przechodzi przez granicę między rzadszym a gęstszym ośrodkiem, na przykład z powietrza do wody lub do szkła (dlatego właśnie słomka w szklance dzinu z tonikiem wygląda jakby była złamana), co można łatwo wytłumaczyć na gruncie teorii korpuskularnej, jeśli się założy, że korpuskuły poruszają się szybciej wewnątrz ośrodka „optycznie gęstszego”. Jednak nawet w czasach Newtona istniał inny sposób na wyjaśnienie tych wszystkich zjawisk. Christiaan Huygens, holenderski fizyk urodzony w 1629 roku, a więc trzynastu lat starszy od Newtona, był autorem teorii, zgodnie z którą światło nie jest strumieniem cząstek,

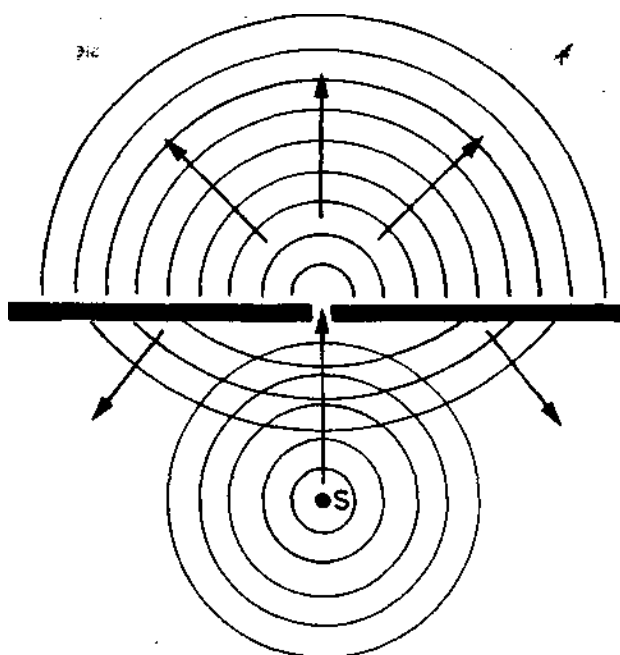
lecz falą. Analogicznie do fali poruszającej się na powierzchni morza lub jeziora światło biegnie poprzez niewidoczny ośrodek zwany eterem świetlnym. Podobnie jak fala rozchodząca się wokół wrzuconego do wody kamienia fale świetlne miałyby rozprzestrzeniać się we wszystkich kierunkach w eterze wokół źródła światła. Teoria falowa równie dobrze jak teoria korpuskularna tłumaczyła odbicie i załamanie światła. Zamiast tak jak korpuskuły poruszały się szybciej, fale światła były powolniejsze w ośrodku optycznie gęstszym, ale w siedemnastym wieku nie istniał sposób zmierzenia prędkości światła, więc na podstawie tej różnicy nie można było rozstrzygnąć konfliktu między dwiema teoriami. Istniała wszakże jedna obserwowalna różnica w przewidywaniach obu teorii. Gdy światło przechodzi obok ostrej krawędzi, powstaje ostra granica cienia. Dokładnie w taki sposób powinien się zachować strumień cząstek poruszających się po linii prostej. Fala ma skłonność do dyfrakcji, nieznacznego uginania się w kierunku cienia (podobnie jak zmarszczki na wodzie opływającej skałę). Trzysta lat temu dowód ten przeważał na korzyść teorii korpuskularnej, a teoria falowa została odrzucona (aczkolwiek nie zapomniana). Jednakże na początku dziewiętnastego stulecia sytuacja uległa niemal całkowitemu odwróceniu.



Ryc. 1.1. Równoległe fale wodne po przejściu przez mały otwór rozchodzą się jako okręgi, nie zostawiając „cienia”

W osiemnastym wieku niewielu uczonych traktowało teorię falową poważnie. Do nielicznych wyjątków należał Szwajcar, Leonard Euler, który publikował artykuły w jej obronie. Euler, jeden z czołowych matematyków swojej epoki, wniósł znaczący wkład w rozwój geometrii, rachunku różniczkowego, rachunku całkowego oraz trygonometrii. Nowoczesna matematyka i fizyka są wyrażone przez równania arytmetyczne, a arytmetyczny opis opiera się na technikach w dużej

mierze rozwiniętych przez Eulera. Od niego pochodzą używane do dziś skróty, jak: „pi” - na oznaczenie stosunku obwodu okręgu do jego średnicy; litera *i* na oznaczenie pierwiastka kwadratowego z liczby minus jeden (z którym spotkamy się ponownie, podobnie jak z pi); symbole używane przez matematyków na oznaczenie operacji zwanej całkowaniem. To zadziwiające, że w *Encyclopaedia Britannica* nie ma wzmianki o poglądach Eulera na falową naturę światła, poglądach, których zdaniem jednego z jemu współczesnych, nie podzielał „ani jeden wybitny fizyk”³. Wydaje się, że jedynym współczesnym Eulerowi wybitnym naukowcem, który podzielał jego opinię, był Benjamin Franklin. Jednakże fizycy ignorowali ich obu aż do początków dziewiętnastego stulecia, gdy Anglik, Thomas Young, a wkrótce po nim Francuz, Augustin Fresnel, przeprowadzili nowy eksperyment.



Ryc. 1.2. Zmarszczki na wodzie, powstałe po wrzuceniu kamienia do jeziora, po przejściu przez otwór także rozchodzą się jako okręgi (ze środkiem w miejscu położenia otworu). Fale, które nie trafią na otwór, lecz na przeszkodę, odbijają się od niej

Triumf teorii falowej

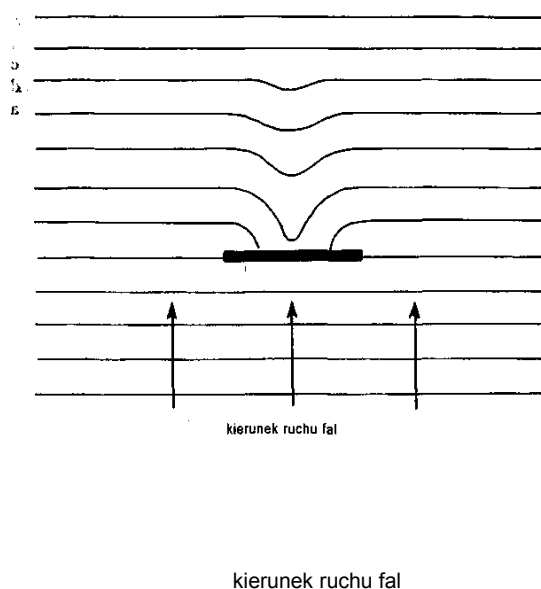
Young wykorzystał wiedzę o sposobie poruszania się fali po powierzchni jeziora w swoim eksperymencie, w którym sprawdzał, czy światło porusza się w ten sam sposób. Wszyscy wiemy, jak wygląda fala na wodzie. Dobrze jest wyobrazić sobie niewielkie zmarszczki na wodzie, a nie duże fale, aby porównanie było dokładniejsze. Charakterystyczną cechą fali jest niewielki wzrost poziomu wody, po którym następuje obniżenie, w miarę jak fala się przemieszcza. Wysokość grzbietu ponad poziom wody nazywa się amplitudą fali. Dla idealnej fali wysokość ta jest taka sama jak przemieszczające się za grzbietem obniżenie poziomu wody. Wokół wrzuconego do jeziora kamienia rozchodzi się seria zmarszczek następujących jedna po drugiej w regularnych

³ Cytat z: E. Ikenberry, *Quantum Mechanics*, s. 2.

odstępach. Długość tych odstępów, mierzona od grzbietu do grzbietu, nazywa się długością fali. Fale dookoła kamienia rozchodzą się kolistnie, ale fale na morzu albo zmarszczki na jeziorze wywołane przez wiatr mogą biec do przodu jako seria linii prostych, równoległych fal następujących jedna po drugiej. W jednym i drugim przypadku liczba grzbietów fal mijających w ciągu sekundy jakiś ustalony punkt - na przykład skałę - określa częstotliwość fali. Częstotliwość jest równa liczbie długości fali przebiegających w ciągu sekundy, zatem prędkość fali, czyli szybkość przemieszczania każdego grzbietu, jest równa długości fali pomnożonej przez częstotliwość.

Wspomniany kluczowy eksperyment wywodzi się od fal równoległych, czyli podobnych do szeregu morskich fal nadciągających w stronę plaży. Fale takie można sobie wyobrazić jako efekt wrzucenia do wody bardzo dużego przedmiotu daleko od plaży. Jeśli plaża jest dostatecznie daleko, to rozchodzące się fale robią wrażenie równoległych, płaskich fal, gdyż trudno jest wykryć zakrzywienie niewielkiego wycinka bardzo dużego okręgu. Zachowanie takich płaskich fal można wygodnie badać, wytwarzając je sztucznie w niedużym zbiorniku wody. Jeżeli na ich drodze ustawi się niedużą przeszkodę, to fale ugną się wokół niej - ulegną dyfrakcji - i pozostawią bardzo mały „cień”. Jeśli jednak przeszkoda jest duża w porównaniu z długością fali, to ugięta część fali wypełni jedynie niewielką część cienia, pozostawiając za przeszkodą obszar niezafalowanej wody. Zatem jeśli falą jest światło, to ostra granica cienia powstaje wtedy, gdy długość fali świetlnej jest bardzo mała w porównaniu z rozmiarami przedmiotu rzucającego cień.

A teraz zróbmy coś odwrotnego. Wyobraźmy sobie płaskie fale przemieszczające się przez nasz zbiornik z wodą i natrafiające nie na otoczoną wodą przeszkodę, ale na litą ścianę ustawioną w poprzek zbiornika, z małym otworem w środku.

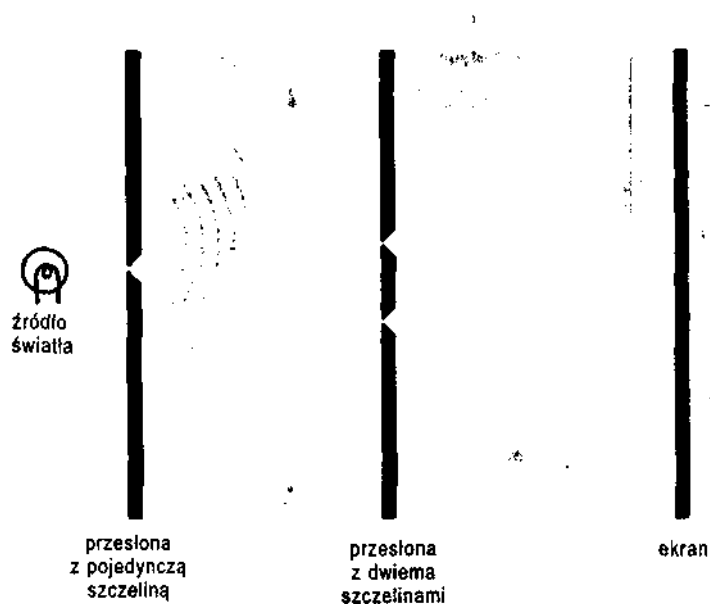


Ryc. 1.3. Uginanie fal przy przejściu obok krawędzi powoduje, że zapełniają one szybko obszar cienia za przeszkodą, jeżeli tylko rozmiary przeszkody nie są dużo większe od długości fali

Jeśli otwór jest znacznie większy niż długość fali, to część fali biegnąca na jego wysokości przedostanie się przezeń, lekko uginając się na brzegach, ale zostawiając w spokoju większość

wody po drugiej stronie, podobnie jak fale przedostające się do portu przez przejście w falochronie. Jeśli jednak otwór w ścianie jest bardzo mały, to zachowuje się on jak źródło fal kolistych, jak gdyby ktoś upuszczał małe kamyki dokładnie w miejscu otworu. Te koliste (albo - bardziej precyzyjnie - półkoliste) fale rozchodzą się po drugiej stronie ściany, nie zostawiając nigdzie spokojnej wody.

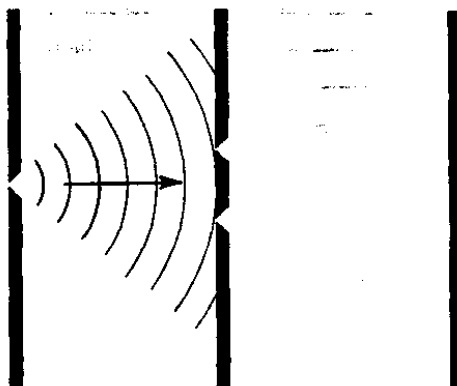
Na razie wszystko jest proste. Teraz dochodzimy do eksperymentu Younga. Wyobraźmy sobie podobny układ jak dotąd, czyli zbiornik z wodą, w którym równoległe fale biegną w stronę przeszkody, ale tym razem natrafiają na dwa otwory. Każdy otwór działa jak źródło nowej półkolistej fali w obszarze za barierą, ale oba źródła są zsynchronizowane, działają w tej samej fazie, ponieważ napędza je wspólny zespół fal równoległych. W rezultacie za przeszkodą powstaje bardziej skomplikowany układ fal, gdyż mamy dwa zespoły fal półkolistych rozchodzące się w tej samej fazie z obu otworów. Gdy spotkają się dwa grzbiety, tworzy się wyższy grzbiet; gdy grzbiet jednej fali spotka się z doliną drugiej, nawzajem się znoszą i poziom wody pozostaje nie zmieniony. Te dwa efekty nazywają się odpowiednio: konstruktywna i destruktywna interferencja. Można je zaobserwować, wrzucając do jeziora dwa kamyki równocześnie. Jeżeli światło jest falą, to w równoważnym eksperymencie powinna powstać podobna interferencja między falami świetlnymi, i to właśnie odkrył Young.



Ryc. 1.4. Zdolność światła do uginania się przy przejściu w pobliżu przeszkody albo przez otwór można badać za pomocą przesłony z pojedynczą szczeliną (dającą fale koliste) lub z dwiema szczelinami (powstaje interferencja)

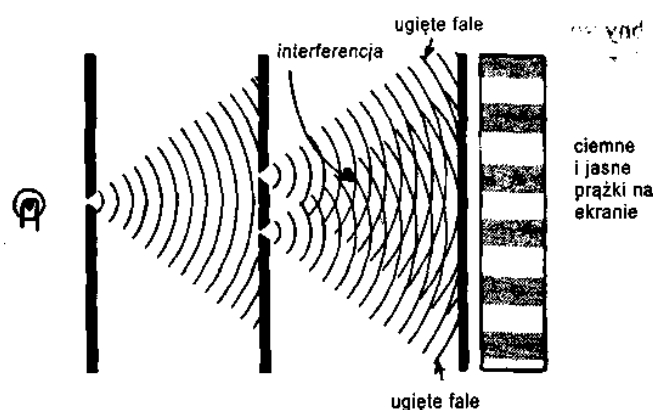
Young ustawił ekran z dwiema wąskimi szczelinami i oświetlił go. Za ekranem światło wychodzące z obu szczelin ugięło się i uległo interferencji. Jeżeli analogia z falami na wodzie jest poprawna, to za ekranem powinien utworzyć się obszar interferencyjny, w którym w wyniku konstruktywnej interferencji światła z obu szczelin powstają jasne obszary silnego światła na przemian z ciemnymi, wywołanymi przez destruktywną interferencję. Gdy Young umieścił za szczelinami biały ekran, zobaczył właśnie takie zjawisko - naprzemianległe pasma światła i cienia.

Eksperyment Younga nie zrobił furory w świecie nauki, zwłaszcza w Anglii, gdzie jakakolwiek opozycja wobec poglądów Newtona była traktowana niemalże jak herezja, a w każdym razie jak postępek wysoce „niepatriotyczny”



Ryc. 1.5. Podobnie jak zmarszczki na wodzie, fale świetlne rozchodzą się jako okręgi po przejściu przez pojedynczą szczelinę

Newton zmarł w 1727 roku, a w 1705 - mniej niż sto lat przed ogłoszeniem wyników eksperymentu Younga - otrzymał tytuł szlachecki, pierwszy taki tytuł nadany za pracę naukową. Na detronizację idola w jego ojczyźnie było za wcześnie, więc być może szczęśliwym zbiegiem okoliczności, w dobie wojen napoleońskich ten niepatriotyczny czyn wziął na siebie Francuz, Augustin Fresnel, który ostatecznie potwierdził, że światło ma falową naturę. Praca Fresnela, aczkolwiek o kilka lat późniejsza niż Younga, była bardziej kompletna i tłumaczyła niemal wszystkie aspekty zachowania światła na gruncie teorii falowej. Fresnel między innymi podał wyjaśnienie znanego zjawiska, gdy światło odbite od cienkiej warstwy oleju wytwarza piękne kolorowe refleksy.



Ryc. 1.6. Fale koliste, rozchodzące się z każdej z dwóch szczelin, interferują ze sobą, dając na ekranie obraz złożony z naprzemianległych obszarów światła i cienia -jest to oczywisty dowód, że światło zachowuje się w tym doświadczeniu jak fala

Część światła padającego na plamę oleju odbija się od górnej powierzchni, a część wnika w olej i odbija się od dolnej powierzchni, a następnie ponownie przechodzi przez górną. Padające białe światło jest złożone ze wszystkich kolorów tęczy, a każdemu kolorowi odpowiada inna długość fali,

więc w rezultacie powstaje wiele kolorów, gdyż niektóre odbite wiązki światła interferują destruktywnie, a inne konstruktywnie, zależnie od długości fali i od kąta, pod jakim wpadają do oka.

Gdy Leon Foucault, francuski fizyk, znany jako twórca wahadła, które zostało nazwane jego imieniem, zdołał w połowie dziewiętnastego wieku ustalić, że, wbrew przewidywaniom korpuskularnej teorii Newtona, prędkość światła w wodzie jest mniejsza niż w powietrzu, nikt z szanowanych uczonych nie spodziewał się niczego innego. Wtedy już „każdy wiedział”, że światło jest falą przemieszczającą się przez ośrodek zwany eterem, aczkolwiek niezbyt jasne było, czym jest eter i co dokładnie „faluje” w wiązce światła. Gdy w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych ubiegłego wieku wielki szkocki fizyk, James Clerk Maxwell, odkrył istnienie fal związanych ze zmiennym polem elektrycznym i magnetycznym, teoria światła wydawała się kompletna. Maxwell wywnioskował, że to elektromagnetyczne promieniowanie polega na przemieszczaniu się pola magnetycznego i elektrycznego, w którym obszary słabszego i silniejszego pola układają się w podobny sposób jak grzbiety i doliny fali układają się na wodzie. W 1887 roku - zaledwie sto lat temu - Heinrich Hertz zdołał wytworzyć i zarejestrować falę radiową, promieniowanie elektromagnetyczne podobne do światła, lecz o większej długości fali. Falowa teoria światła nareszcie była kompletna - w samą porę, by mogła zostać obalona przez największą rewolucję w nauce od czasów Newtona i Galileusza.

Ktoś, kto w końcu dziewiętnastego stulecia odważył się sugerować korpuskularną naturę światła, mógł być albo głupcem, albo geniuszem. Tym kimś był Albert Einstein. Zanim spróbujemy zrozumieć, dlaczego dokonał tego śmiałego kroku, potrzebujemy trochę więcej wiadomości o fizyce dziewiętnastego wieku.

Rozdział drugi

Atomy

Wiele popularnych dzieł o historii nauki jako autorów koncepcji atomu wymienia starożytnych Greków, chwając ich przy okazji za trafną intuicję. Przypisywanie starożytnym zrozumienie prawdziwej struktury materii wydaje się lekką przesadą, mimo iż prawdą jest, że Demokryt z Abdera, który zmarł około roku 370 p.n.e., rzeczywiście zaproponował wyjaśnienie złożonej natury świata poprzez teorię, według której wszystko jest zbudowane z różnego rodzaju niepodzielnych atomów. Każdy ich rodzaj charakteryzował się innym kształtem i różnymi rozmiarami, i wszystkie znajdowały się w ciągłym ruchu. „Jedyne, co istnieje, to atomy i pusta przestrzeń, reszta jest opinią”, napisał Demokryt⁴. Jego poglądy głosili później Epikur z Samos i Rzymianin Lukrecjusz, ale nie zdobyły one szerszego uznania. Znacznie bardziej popularna okazała się sugestia Arystotelesa, zgodnie z którą świat jest zbudowany z czterech „żywiół”: ognia, ziemi, powietrza i wody. Idea atomu została do czasów Chrystusa w zasadzie zapomniana, natomiast cztery żywioły Arystotelesa przetrwały dwa tysiące lat.

Pomimo że w siedemnastym wieku Anglik, Robert Boyle, zastosował koncepcję atomu w swojej pracy z chemii, a Newton rozważał teorię atomową podczas swoich badań nad fizyką i optyką, atomy weszły do języka nauki w drugiej połowie osiemnastego stulecia, gdy francuski chemik, Antoine Lavoisier, obserwował zjawisko spalania ciał. Lavoisier odkrył wiele rzeczywistych pierwiastków, czystych substancji chemicznych, których nie da się rozłożyć na inne substancje, i rozumiał, że proces spalania ciał polega na połączeniu tlenu z powietrza z innymi pierwiastkami. W pierwszych latach dziewiętnastego stulecia John Dalton ustalił rolę atomów w chemii, stwierdziwszy, że materia jest zbudowana z niepodzielnych atomów, że wszystkie atomy tego samego pierwiastka są identyczne, ale różne pierwiastki są zbudowane z różnych atomów (różnych rozmiarów lub kształtów), że atomy nie mogą być stworzone ani zniszczone, ale mogą się łączyć lub rozdzielać w trakcie reakcji chemicznych, że związek chemiczny złożony z dwóch lub więcej pierwiastków składa się z cząsteczek (molekuł), z których każda zawiera niewielką, określoną liczbę atomów każdego z tych pierwiastków. Atomistyczna teoria materialnego świata, której uczymy się dziś z podręczników, powstała zatem niespełna dwieście lat temu.

Atomy dziewiętnastowieczne

Koncepcja atomu dosyć powoli zdobywała uznanie chemików. Joseph Gay-Lussac odkrył, że gdy dwie substancje gazowe łączą się ze sobą w reakcji chemicznej, to objętości składników pozostają wobec siebie w prostej proporcji. Jeżeli produkt reakcji posiada również postać gazową, to jego objętość też pozostaje w prostej proporcji w stosunku do objętości obu składników. To zgadza się z teorią, według której każda cząsteczka produktu reakcji jest zbudowana z jednego lub dwóch atomów jednego gazu połączonych z kilkoma atomami drugiego gazu. W 1811 roku Włoch,

⁴ Cytowane w wielu książkach, m.in. Jay M. Pasachoff, M.L. Kutner, *Invitation to Physics*, s. 3.

Amadeo Avogadro, wyprowadził z tego odkrycia swoją sławną hipotezę, która mówi, że w ustalonej temperaturze i pod stałym ciśnieniem jednakowe objętości gazów zawierają tę samą liczbę cząsteczek, niezależnie od składu chemicznego gazów. Późniejsze doświadczenia potwierdziły słuszność hipotezy Avogadry. Można wykazać, że litr gazu pod ciśnieniem jednej atmosfery i w temperaturze 0°C zawiera około 27 000 miliardów miliardów (27×10^{21}) cząsteczek. Ale dopiero rodak Avogadry, Stanislao Cannizzaro, tak rozwinął tę teorię, że znacznie więcej chemików zaczęło traktować ją poważnie. Jeszcze około roku 1890 wielu chemików wciąż nie akceptowało idei Daltona i Avogadry. Wyprzedził ich jednak rozwój wydarzeń w fizyce, gdzie zachowanie gazów zostało szczegółowo wyjaśnione, przy wykorzystaniu koncepcji atomu, przez Szkota, Jamesa Clerka Maxwella, i Austriaka, Ludwiga Boltzmannna.

W latach 1860-1870 ci dwaj pionierzy stworzyli teorię, która mówi, że gaz jest zbudowany z atomów lub cząsteczek (liczba Avogadry daje pewne pojęcie o tym, jak dużo jest tych cząsteczek), które można uważać za małe, twarde kulki poruszające się wewnątrz pojemnika z gazem i zderzające się ze sobą oraz ze ścianami pojemnika. To zgadzało się z ideą ciepła jako formą ruchu - gdy rośnie temperatura gazu, cząsteczki poruszają się szybciej i wywierają większe ciśnienie na ściany pojemnika. Jeżeli ściany nie są sztywne, pojemnik się rozszerza. Kluczową cechą tych nowych pomysłów było zastosowanie praw mechaniki Newtona do bardzo dużej liczby atomów lub cząsteczek i wytłumaczenie zachowania gazu statystyczne, poprzez uśrednienie zachowania pojedynczych cząsteczek. Jedna cząsteczka może w danym momencie poruszać się w dowolnym kierunku, ale łączny efekt zderzeń wielu cząsteczek ze ścianami pojemnika prowadzi do powstania stałego ciśnienia. Ta idea doprowadziła do matematycznego opisu procesów gazowych, nazwanego mechaniką statystyczną.

Wciąż jednak nie istniał bezpośredni dowód na istnienie atomów. Niektórzy wybitni fizycy byli zdecydowanie przeciwni hipotezie atomowej. Nawet sam Boltzmann miał (być może niesłuszne) poczucie, że samotnie przeciwstawia się przeważającej opinii ogółu. W 1898 roku opublikował szczegóły swoich obliczeń z nadzieją, „że kiedy teoria gazowa zostanie przywrócona do życia, nie wszystko będzie musiało być na nowo odkrywane”⁵. W 1906 roku Boltzmann, chory i załamany opozycją wobec jego kinetycznej teorii gazu ze strony wielu liczących się uczonych, popełnił samobójstwo, nieświadomy, że kilka miesięcy wcześniej niejaki Albert Einstein, nikomu nie znany teoretyk, opublikował pracę, która nie pozostawiała żadnych wątpliwości co do realności atomów.

Atomy Einsteina

Wspomniana praca była jedną z trzech opublikowanych przez Einsteina w 1905 roku w tym samym tomie czasopisma „Annalen der Physik”. Każdy z owych artykułów zapewniłby mu miejsce w annałach fizyki. W pierwszym Einstein sformułował szczególną teorię względności, która w zasadzie nie wiąże się z tematami poruszonymi w niniejszej książce. Drugi artykuł dotyczył oddziaływania światła z elektronami i został później uznany za jeden z fundamentów tego, co obecnie określamy mianem mechaniki kwantowej. Za tę właśnie publikację Einstein otrzymał w

⁵ Cytat z: J. Mehra, H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory*, t. 1, s. 16.

1921 roku Nagrodę Nobla. Trzecia praca była pozornie prostym wyjaśnieniem zagadki, która od 1827 roku wprawiała fizyków w zakłopotanie, wyjaśnieniem, które potwierdziło - na tyle, na ile teoretyczna praca mogła to uczynić - realność atomów.

Einstein później wspominał, że jego głównym celem w tym czasie było „znalezienie faktów, które świadczyłyby o istnieniu atomów o określonych skończonych rozmiarach”⁶, co do pewnego stopnia pokazuje, jak ważna była to kwestia na początku obecnego stulecia. W czasie, gdy owe trzy prace się ukazały, Einstein pracował jako urzędnik w biurze patentowym w Bernie. Jednak niekonwencjonalne podejście do fizyki nie gwarantowało mu posady akademickiej, nawet po uzyskaniu formalnego wykształcenia. Jego logiczny umysł okazał się bardzo skuteczny w odsiewaniu plew od ziarna wśród nowych wynalazków, a praca w urzędzie zostawiała mu mnóstwo wolnego czasu na myślenie o fizyce, nawet w godzinach służbowych. Między innymi interesował się odkryciami brytyjskiego botanika, Thomasa Browna (dokonanymi niemal osiemdziesiąt lat wcześniej). Brown zauważył, że zanurzone w kropli wody pyłki kwiatów, a obserwowane pod mikroskopem, poruszają się w chaotyczny sposób, zwany obecnie ruchami Browna. Einstein wykazał, że ruchy te, aczkolwiek chaotyczne, podlegają określonym prawom statystycznym, i że ich zachowanie jest dokładnie takie, jakiego należałoby się spodziewać, gdyby pyłki były popychane albo „kopane” przez niewidoczne, submikroskopowe cząsteczki, które z kolei poruszają się zgodnie ze statystyką zastosowaną przez Boltzmana i Maxwella do opisu ruchu atomów w gazie lub cieczy. Dzisiaj wydaje się to tak oczywiste, że trudno jest docenić, jak olbrzymim przełomem była ta praca. Dla nas, przyzwyczajonych do koncepcji atomu, nie ma żadnych wątpliwości, że jeśli pyłki zderzają się, to sprawcami tych zderzeń są niewidoczne atomy. Jednak zanim Einstein to skojarzył, wielu uznanych naukowców wątpiło w realność atomów. Publikacja Einsteina rozwiązała wszelkie wątpliwości⁷. Po rozwiązaniu zagadka przestaje być zagadką i odpowiedź wydaje się oczywista, ale jeśli była taka oczywista, to dlaczego przez osiemdziesiąt lat nikt na to nie wpadł?

Ironią losu był fakt, że artykuł Einsteina ukazał się w czasopiśmie niemieckojęzycznym („Annalen der Physik”), gdyż to głównie niemieckojęzyczni uczeni, m.in. Ernst Mach i Wilhelm Ostwald, doprowadzili do sytuacji, w której poglądy Boltzmana były głosem wołającego na puszczy. W rzeczy samej, na początku dwudziestego wieku istniało wiele dowodów na istnienie atomów, mimo że, ściśle biorąc, dowody te można by raczej określić jako poszlaki. Brytyjcy i francuscy uczeni mieli znacznie większe przekonanie do teorii atomowej niż niektórzy ich niemieccy koledzy. To właśnie Brytyjczyk, J.J. Thomson, odkrył w 1897 roku elektron - cząstkę, o której obecnie wiemy, że jest jednym ze składników atomu.

Elektrony

Gdy wewnątrz opróżnionej z powietrza rury umieści się drut i przepuści przez niego prąd elektryczny, wytwarzane jest promieniowanie - znane pod nazwą promieni katodowych - którego

⁶ Cytat z: A. Einstein, *Zapiski autobiograficzne*, przeł. J. Bieroń, Znak, Kraków 1996, s. 31.

⁷ Teorię ruchów Browna opracował, niezależnie i niemal równocześnie z Einsteinem, Marian Smoluchowski - obok Marii Skłodowskiej-Curie najbardziej znany w świecie polski fizyk (przyp. tłum.).

natura stanowiła przez długi czas zagadkę. Mogły to być fale generowane przez drgania eteru, ale o innych właściwościach niż światło i niedawno odkryte fale radiowe, albo mogły to być strumienie cząstek. Pod koniec dziewiętnastego wieku większość niemieckich uczonych uważała promienie katodowe za fale, Brytyjczycy i Francuzi skłaniali się ku koncepcji korpuskularnej. Odkrycie w 1895 roku promieni X przez Wilhelma Roentgena (za które w 1901 roku otrzymał pierwszą w historii Nagrodę Nobla z fizyki) jeszcze bardziej zagmatwało sytuację i w pewnym sensie nastąpiło za wcześnie, zanim powstały teoretyczne podstawy, które pozwoliłyby wytłumaczyć ich istnienie. Powrócimy do tego ważnego, ale przedwczesnego odkrycia w dalszej części książki, w bardziej logicznym kontekście.

W latach siedemdziesiątych ubiegłego stulecia Thomson pracował w Cavendish Laboratory, ośrodku badawczym założonym przez Maxwella w Cambridge, jako pierwszy profesor katedry nazwanej również imieniem Cavendisha, gdzie m.in. zaprojektował⁸ eksperyment wykorzystujący równoważenie się sił elektrycznych i magnetycznych działających na poruszającą się naładowaną cząstkę. Zarówno pole elektryczne, jak i magnetyczne odchyła trajektorię, po której porusza się naładowana elektrycznie cząstka. Aparatura Thomsona była tak zaprojektowana, żeby można było oba te efekty zrównoważyć, w wyniku czego wiązka promieni katodowych biegła po linii prostej od ujemnie naładowanej metalowej płytki (katody) do ekranu detektora⁹. Ten trik działa tylko dla cząstek naładowanych elektrycznie, a zatem Thomson odkrył, że promienie katodowe rzeczywiście są ujemnie naładowanymi cząstkami (obecnie zwanymi elektronami). Dobierając odpowiednio pole elektryczne oraz magnetyczne tak, aby zrównoważyć siły działające na biegnące cząstki, Thomson mógł wyliczyć stosunek ładunku elektrycznego do masy elektronu (e/m). Wynik nie zależy od rodzaju materiału, z którego zrobiona jest katoda, więc Thomson wywnioskował, że elektrony są składnikami atomów oraz że elektrony we wszystkich atomach są identyczne, mimo iż różne pierwiastki zbudowane są z różnych atomów.

Nie było to przypadkowe odkrycie, lecz wynik szczegółowo zaprojektowanego i precyzyjnie przeprowadzonego eksperymentu. Cavendish Laboratory zostało stworzone przez Maxwella, ale Thomsonowi zawdzięcza ono reputację czołowego, a być może najlepszego ośrodka fizyki doświadczalnej początku dwudziestego stulecia, gdy na fali nowych odkryć powstawały teorie, które ukształtowały współczesną fizykę. W okresie przed pierwszą wojną światową siedem osób z Cavendish Laboratory, nie licząc samego Thomsona, otrzymało Nagrodę Nobla. Cavendish Laboratory do dnia dzisiejszego pozostaje światowym centrum fizyki.

Jony

Promienie katodowe, wytwarzane w próżni przez ujemnie naładowaną elektrodę, okazały się ujemnie naładowanymi cząstkami - elektronami. Atomy same w sobie są elektrycznie obojętne,

⁸ „Zaprojektował” jest w tym kontekście nader właściwym słowem, gdyż J.J. Thomson był znany z niezgrabności. Planował błyskotliwe eksperymenty, które jednak wykonywali inni. Jego syn, George, mawiał, że J.J. (tak go zwykle zwano) „potrafi zdiagnozować błędy aparatury z nadzwyczajną dokładnością, lepiej jednak nie pozwolić mu ich poprawiać” (por. B.L. Cline, *The Questioners*, s. 13).

⁹ Aparatura Thomsona jest prototypem dzisiejszego telewizora. Na końcu rury, zwanej rurą katodową, znajduje się ekran, na który padają elektrony odchylane przez pole magnetyczne.

zatem jest dosyć logiczne, że istnieją dodatnio naładowane odpowiedniki elektronów, czyli atomy pozbawione części swego ujemnego ładunku. Jedne z pierwszych badań tych dodatnio naładowanych cząstek wykonał na uniwersytecie w Wurzburgu około roku 1898 Wilhelm Wien i odkrył, że są one znacznie cięższe niż elektrony, czego zresztą należało się spodziewać, zważywszy, że są to po prostu atomy pozbawione jednego elektronu. Kontynuując badania promieni katodowych, Thomson podjął kolejne wyzwanie i wykonał serię trudnych eksperymentów z dodatnio naładowanymi cząstkami, które zostały nazwane promieniami kanalikowymi. Doświadczenia te trwały aż do lat dwudziestych obecnego stulecia i wykorzystywały zmodyfikowaną aparaturę do badań elektronów, czyli rurę katodową, w której pozostawiono trochę gazu. Elektrony „katodowe” biegnące przez rurę zderzają się z atomami gazu i wybijają elektrony z atomów, zostawiając dodatnio naładowane cząstki, które dziś nazywamy zjonizowanymi atomami, albo po prostu jonami. Poruszające się jony można przepuścić przez skrzyżowane pola elektryczne i magnetyczne, podobnie jak uprzednio elektrony. W 1913 roku zespół Thomsona badał w ten sposób jony wodoru, tlenu i innych gazów, m.in. neonu. Gdy przez rurę katodową z niewielką ilością neonu przepływa prąd elektryczny, neon świeci. Aparatura Thomsona była więc prototypem współczesnej neonówki, ale Thomson odkrył rzecz o wiele ważniejszą niż nowy rodzaj szyldu reklamowego. Okazało się, że istnieją trzy różne rodzaje jonów neonu, każdy z takim samym ładunkiem elektrycznym jak elektron (ale z odwrotnym znakiem, $+e$ zamiast $-e$), ale różniące się masą. To było pierwsze doświadczalne potwierdzenie faktu, że pierwiastki chemiczne często zawierają atomy o różnych masach, ale o identycznych własnościach chemicznych. Dzisiaj mówimy na nie izotopy. Od odkrycia izotopów do wyjaśnienia przyczyny ich istnienia upłynęło wszakże sporo czasu.

Thomson miał już dostatecznie dużo informacji, aby pokusić się o próbę wyjaśnienia, jak wygląda atom od środka. Wbrew opiniom niektórych greckich filozofów atom nie jest niepodzielną, ostateczną cząstką materii, lecz mieszaniną dodatnio i ujemnie naładowanych cząstek, z której można wyłuskać elektrony, zostawiając dodatnio naładowany jon. Thomson wyobrażał sobie atom jako coś w rodzaju melona - stosunkowo dużą kulę z dodatnim ładunkiem rozłożonym równomiernie w całej objętości, z malutkimi elektronami uwiązanymi jak ziarenka, z których każde niosło porcję ujemnego ładunku. Okazało się później, że Thomson się nieco pomylił, ale jego model był - dosłownie - doskonałą tarczą strzelecką, a intensywna praktyka strzelecka następców Thomsona przyniosła bardziej dokładne informacje na temat struktury atomu. Żeby je zgłębić, musimy w naszej opowieści uczynić jeden krok wstecz, a następnie dwa kroki naprzód.

Promienie X

Kluczem do odszyfrowania zagadki - struktury atomu - stało się odkrycie promieniotwórczości w 1896 roku. Odkrycie promieniotwórczości było, podobnie jak kilka miesięcy wcześniej promieni X, w dużej mierze dziełem szczęśliwego przypadku, aczkolwiek w tamtych czasach niektóre laboratoria odnotowały nadspodziewanie dużą liczbę takich szczęśliwych przypadków. Wilhelm Roentgen eksperymentował z promieniami katodowymi, podobnie jak wielu innych fizyków w

owych latach. Gdy promienie katodowe (elektrony) natrafiają na swej drodze na obiekt materialny, w wyniku zderzenia powstaje wtórne promieniowanie. Jest ono niewidoczne, lecz można go wykryć poprzez efekt, jaki ono wywołuje na filmie lub płycie fotograficznej, albo na ekranie fluorescencyjnym - przyrządzie reagującym błyskami światła na padające nań promieniowanie. Roentgen przypadkowo położył taki ekran w pobliżu układu doświadczalnego z promieniami katodowymi i oczywiście zauważył, że ekran fluoryzuje, gdy w rurze katodowej zachodzi wyładowanie. W ten sposób odkrył wtórne promieniowanie katodowe, które nazwał X, jako że litera X jest tradycyjnie stosowana do oznaczania niewiadomej w równaniach matematycznych. Rychło się okazało, że promienie X zachowują się jak fale (teraz wiemy, że są one niczym innym jak promieniowaniem elektromagnetycznym, podobnie jak fale świetlne, lecz o znacznie mniejszej długości fali). To odkrycie w niemieckim laboratorium przyczyniło się do umocnienia większości niemieckich fizyków w przekonaniu, że promienie katodowe także są falami.

Odkrycie promieni X, ogłoszone w grudniu 1895 roku, wywołało wrzenie w środowisku naukowym. Wielu badaczy zaczęło szukać innych sposobów wytworzenia promieniowania X oraz efektów z nim związanych. Najbardziej intrygującą właściwością promieni X była ich zdolność do przenikania przez różne nieprzejrzyste substancje, na przykład czarny papier, a następnie utworzenia obrazu na płycie fotograficznej, która w ogóle nie została naświetlona zwykłym światłem. Pracujący w Paryżu Henri Becquerel zajmował się fosforescencją, czyli zjawiskiem emisji światła przez substancję, która uprzednio światło zaabsorbowała. Ekran fluorescencyjny - ten sam, który przyczynił się do odkrycia promieni X - emituje światło jedynie w momencie, gdy zostanie „pobudzony” przez padające nań promieniowanie. Natomiast substancja fosforescencyjna ma zdolność magazynowania absorbowanego promieniowania i uwalniania go w postaci światła przez wiele godzin po naświetleniu, ze stopniowo malejącym natężeniem. Poszukiwanie związku między promieniami X a zjawiskiem fosforescencji było dosyć naturalne, ale Becquerel odkrył coś równie nieoczekiwanego jak uprzednio same promienie X.

Radioaktywność

W lutym 1896 roku Becquerel zawiązał płytę fotograficzną w podwójną warstwę czarnego papieru, pokrył papier dwusiarczkiem uranu i potasu i wystawił na kilka godzin na słońce. Gdy na wywołanej płycie pojawił się ślad w miejscu pokrycia związkami chemicznymi, uczoney sądził, że słońce wytworzyło promienie X w soli uranowej w analogiczny sposób, w jaki powstaje fosforescencja. Dwa dni później w ten sam sposób przygotował kolejną płytę, chcąc powtórzyć eksperyment, ale przez kolejne dwa dni niebo było pochmurne, więc płyta została zamknięta w szafie. Pierwszego marca Becquerel mimo to wywołał płytę i ponownie znalazł ślad w miejscu pokrycia dwusiarczkiem uranu. Okazało się, że zaciemnienie płyt nie miało nic wspólnego ani ze światłem słonecznym, ani z fosforescencją, lecz było wywołane przez nieznane promieniowanie pochodzące z samego uranu i, co więcej, najwidoczniej nie związane z żadnym zewnętrznym czynnikiem. Dzisiaj nazywamy to samoczynne promieniowanie radioaktywnością.

Badanie radioaktywności podjęło wielu innych uczonych. Maria i Piotr Curie, pracujący na Sorbonie, wkrótce wyspecjalizowali się w tej nowej dziedzinie badań. W 1903 roku otrzymali Nagrodę Nobla za prace w dziedzinie radioaktywności oraz za odkrycie nowych pierwiastków radioaktywnych. W 1911 roku Maria dostała drugą nagrodę, tym razem z chemii, za swoje dalsze prace w tej samej dziedzinie (Irena Curie, córka Marii i Piotra, także zdobyła Nagrodę Nobla za pracę nad radioaktywnością w latach trzydziestych). W pierwszych latach dwudziestego wieku eksperymenty z dziedziny radioaktywności wyprzedzały teorię, nowe odkrycia musiały więc dosyć długo czekać na teoretyczne wyjaśnienie. Spośród badaczy tamtych czasów na czoło zdecydowanie wybija się Ernest Rutherford.

Rutherford był Nowozelandczykiem. W latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku pracował u Thomsona w Cavendish Laboratory. W 1898 roku przeniósł się do Kanady, gdzie został mianowany profesorem fizyki na uniwersytecie w Montrealu, a w 1902 roku, wspólnie z Frederikiem Soddy, wykazał, że promieniotwórczość jest związana z przemianą radioaktywnego pierwiastka w inny pierwiastek w trakcie procesu fizycznego zwanego dziś rozpadem promieniotwórczym. Rutherford odkrył, że w wyniku rozpadu powstają dwa rodzaje promieniowania, które nazwał alfa i beta. Odkryty później trzeci rodzaj został naturalnie nazwany gamma. Alfa i beta były strumieniami szybko poruszających się cząstek, a gamma - promieniowaniem elektromagnetycznym, podobnie jak promienie X, lecz o jeszcze mniejszej długości fali. Promieniowanie beta dosyć szybko zidentyfikowano jako „radioaktywny” odpowiednik promieni katodowych, czyli elektrony, ale promienie alfa okazały się czymś całkiem nowym - są to cząsteczki około cztery razy cięższe od atomu wodoru, a niosą ładunek elektryczny dwukrotnie większy niż elektron, lecz o przeciwnym znaku.

Wnętrze atomu

Promienie alfa znalazły zastosowanie jeszcze zanim ktokolwiek poznał dokładnie ich naturę i sposób, w jaki te szybko poruszające się cząstki powstają w procesie przemiany jednego pierwiastka w drugi. Rutherford użył ich jako sondy do badania struktury atomów, stwarzając interesującą sytuację, w której cząstki alfa - same będące produktem reakcji atomowej - bombardują inny atom, aby w rezultacie umożliwić wykrycie, skąd się one biorą. W 1907 roku Rutherford przeniósł się z Montrealu do Manchesteru, gdzie również otrzymał posadę profesora na tamtejszym uniwersytecie. W następnym roku otrzymał Nagrodę Nobla - w dziedzinie chemii za prace nad radioaktywnością, co wzbudziło w nim ironiczne rozbawienie. Komitet Noblowski potraktował studia nad radioaktywnością jako badanie pierwiastków chemicznych, natomiast Rutherford uważał się za fizyka i nie miał czasu na chemię, którą zresztą traktował jako bardzo podrzędną dziedzinę nauki. (Stary dowcip fizyków, w myśl którego chemia jest tylko jedną z dziedzin fizyki, przestał być dowcipem, gdy natura atomu i cząsteczki chemicznej została wyjaśniona na gruncie fizyki kwantowej.) Hans Geiger i Ernest Marsden, pracujący w katedrze Rutherforda w Manchesterze, przeprowadzili w 1909 roku serię eksperymentów, w których strumień cząstek alfa został skierowany na cienką metalową folię.

Źródłem cząstek alfa był naturalny pierwiastek promieniotwórczy (w tamtych czasach nie istniały jeszcze akceleratory). Po przejściu przez folię cząstki były wychwytywane przez liczniki scyntylacyjne (ekrany fluorescencyjne), które na trafienie cząstką reagowały błyskiem światła. Niektóre cząstki przechodziły przez folię na wylot, inne ulegały odchyleniu i wychodziły z folii pod kątem względem kierunku padania, a jeszcze inne - ku zdumieniu eksperymentatorów - odbijały się i biegły z powrotem w stronę źródła. Jak to możliwe?

Rutherford znalazł właściwą odpowiedź! Cząstka alfa ma masę około 7000 razy większą niż elektron (w rzeczy samej cząstka alfa jest niczym innym jak jądrem helu, czyli pozbawionym obu elektronów atomem helu) i może się poruszać z prędkością bliską prędkości światła. Jeżeli taka relatywnie ciężka cząstka zderzy się z elektronem, zmiecie go na bok i podąży dalej, nie zmieniając swej trajektorii. Jej odchylenia muszą być spowodowane przez dodatnie ładunki w atomach metalowej folii (ładunki tego samego znaku odpychają się, podobnie jak bieguny magnesu), ale gdyby model Thomsona był prawidłowy, to żadna cząstka nie mogłaby odbić się do tyłu, w kierunku źródła. Gdyby atom wypełniała jednorodna kula dodatniego ładunku, to cząstki alfa musiałyby przebiegać prosto przez nią, gdyż eksperyment pokazał, że większość cząstek przechodziła przez folię nie odchylona. Jeżeli melon przepuścił jedną cząstkę, to powinien przepuścić także wszystkie pozostałe. Gdyby jednak cały dodatni ładunek atomu był skoncentrowany w małej objętości, znacznie mniejszej od atomu, to od czasu do czasu któraś cząstka alfa musiałaby trafić prosto w tę koncentrację masy i ładunku i odbić się z powrotem, podczas gdy większość cząstek śmigałaby przez pustą przestrzeń pomiędzy dodatnimi składnikami atomów. Tylko przy takim rozkładzie dodatniego ładunku mógłby on odbijać niektóre cząstki alfa z powrotem, inne odchyłać, a jeszcze inne przepuszczać niemal bez odchylenia.

W 1911 roku Rutherford zaproponował nowy model atomu, w którym dodatni ładunek jest skoncentrowany w małej objętości w środku, nazwanej przez Rutherforda jądrem. Jądro zawiera dodatni ładunek atomu w ilości dokładnie równej (lecz przeciwnego znaku) ujemnemu ładunkowi chmury elektronów otaczającej jądro. Tak więc jądro i elektrony łącznie składają się na elektrycznie obojętny atom. Późniejsze doświadczenia pokazały, że rozmiary jądra są około sto tysięcy razy mniejsze od rozmiarów całego atomu - jądro o średnicy około 10^{-13} cm otacza chmura elektronów, której średnica wynosi około 10^{-8} cm. Aby uzmysłwić sobie, ile pustej przestrzeni jest w atomie, wyobraźmy sobie główkę od szpilki, o średnicy milimetra, umieszczoną w centralnym punkcie katedry Świętego Pawła, oraz mikroskopijne cząstki kurzu na powierzchni kopuły budowli, w odległości około 100 metrów od środka. Szpilka reprezentuje jądro atomowe, cząstki kurzu - jego elektronową sferę trzymaną w ryzach przez elektryczne więzy. Wszystkie pozornie trwałe i lite ciała w przyrodzie zbudowane są z tych niemal pustych przestrzeni, gdzieś tam poprzetykanych drobinami ładunku. Gdy Rutherford zaproponował ten nowy model atomu (oparty na wynikach zaprojektowanych przez siebie eksperymentów), był już, jak pamiętamy, laureatem Nagrody Nobla, ale do końca jego naukowej kariery było jeszcze daleko. W 1919 roku ogłosił dokonanie pierwszej sztucznej przemiany pierwiastków i w tym samym roku został następcą J.J. Thomsona

na stanowisku dyrektora Cavendish Laboratory. W roku 1914 otrzymał tytuł szlachecki, a w 1931 - tytuł barona (Baron Rutherford of Nelson). Spośród wszystkich jego sukcesów, nie wyłączając Nagrody Nobla, największym osiągnięciem był niewątpliwie jądrowy model atomu, który zmienił oblicze fizyki, prowadząc do oczywistego pytania: dlaczego ujemnie naładowane elektrony nie wpadają do dodatnio naładowanego jądra, mimo że różnoimienne ładunki przyciągają się równie chętnie, jak jednoimienne odpychają. Odpowiedź na to pytanie pojawiła się w wyniku analizy oddziaływania atomów ze światłem i była zapowiedzią pierwszego okresu epoki kwantowej.

Rozdział trzeci

Światło i atom

Zagadka postawiona przez Rutherforda opierała się na znanym fakcie, że podlegający przyspieszeniu ładunek elektryczny promieniuje energię w postaci fal elektromagnetycznych - światła, fal radiowych itp. Gdyby elektron po prostu tkwił nieruchomo gdzieś wewnątrz atomu, to niechybnie spadłby na jądro, wydzielając przy okazji porcję promieniowania. Na pytanie, dlaczego atomy nie zapadają się, narzucała się odpowiedź, że elektrony poruszają się wokół jądra, podobnie jak planety naszego Układu Słonecznego krążą po swoich orbitach wokół Słońca. Jednak ruch po orbicie jest związany z przyspieszeniem. Wprawdzie prędkość liniowa w ruchu orbitalnym może się nie zmieniać, lecz kierunek ruchu się zmienia, w wyniku czego poruszający się ładunek powinien promieniować energię w postaci fali elektromagnetycznej i wskutek utraty energii opadać ruchem spiralnym na jądro. Nawet zmuszając elektrony do orbitowania wokół jądra teoretycy nie potrafili zapobiec zapadnięciu się atomu Rutherforda.

Aby udoskonalić model Rutherforda, fizycy próbowali znaleźć sposób na utrzymanie elektronów w ich orbitalnym ruchu, opierając się na dosyć naturalnej analogii z Układem Słonecznym. Model został wprawdzie poprawiony, ale analogia okazała się błędna. Jak zobaczymy później, równie dobrze możemy sobie wyobrazić, że elektrony spoczywają w pewnej odległości od jądra, a nie obiegają go wokół. Problem z opadaniem na jądro pozostaje w obu przypadkach, ale nasze wyobrażenie o tym, co się dzieje w atomie, jest całkiem inne, gdy zapomnimy o ruchu orbitalnym. Podejście, które wykorzystali teoretycy, aby wyjaśnić, dlaczego elektrony jednak nie spadają na jądro, jest takie samo, niezależnie od tego, czy przyjmiemy analogię z orbitami, która sama w sobie nic nie wnosi, a na dodatek jest myląca. Większość ludzi pamięta, ze szkoły lub z literatury popularnonaukowej, obraz atomu jako miniaturowego Układu Słonecznego, z jądrem w środku, wokół którego elektrony śmigają po kołowych orbitach. Teraz jednak czas porzucić ten obraz i podejść do dziwnego świata atomów i kwantów z otwartym umysłem. Wyobraźmy sobie atom jako jądro i elektrony umieszczone nieruchomo w przestrzeni i zapytajmy, dlaczego przyciąganie między nimi nie powoduje zapadnięcia się atomu.

Kiedy w drugiej dekadzie dwudziestego wieku teoretycy zaczęli zmagać się z tą zagadką, kluczowe dla zrozumienia tego problemu eksperymenty były już dawno wykonane. Polegały one na badaniach oddziaływania materii (atomów) z promieniowaniem (światłem).

Panujący do początków dwudziestego wieku pogląd na naturę świata wymagał podejścia dualistycznego. Obiekty materialne opisywano w kategoriach cząstek lub atomów, ale promieniowanie elektromagnetyczne, włączając w to światło, uważano za falę. Zatem najlepszą drogą do ujednoczenia fizyki wydawały się badania oddziaływania materii ze światłem. Właśnie podczas próby wyjaśnienia tego oddziaływania w roku 1900, fizyka klasyczna - tak skuteczna w niemal każdej innej dziedzinie - załamała się w ciągu kilku następnych lat.

Aby zobaczyć (dosłownie), jak materia oddziałuje z promieniowaniem, wystarczy spojrzeć na jakiegokolwiek gorące ciało. Każde gorące ciało promieniuje energię. Im bardziej jest gorące, tym więcej energii wypromieniowuje i tym mniejsza jest długość fali tego promieniowania (a większa częstotliwość). Rozgrzany do czerwoności pogrzebacz jest chłodniejszy od rozgrzanego do białości pogrzebacza, a pogrzebacz zbyt chłodny, aby świecić widzialnym światłem, może mimo to być całkiem ciepły, ponieważ wypromieniowuje on światło podczerwone (o niższej częstotliwości). Już pod koniec dziewiętnastego stulecia było jasne, że promieniowanie elektromagnetyczne musi być związane z ruchami małych ładunków elektrycznych. Wprawdzie elektron został odkryty dopiero niedawno, ale nietrudno było sobie wyobrazić, że naładowana elektrycznie część atomu (którą obecnie identyfikujemy z elektronem), drgająca tam i z powrotem, stanowi źródło strumienia fal elektromagnetycznych, podobnie jak poruszając palcem, można wywołać fale na wodzie w wannie. Problem polegał na tym, że połączenie dwóch doskonałych teorii klasycznych - mechaniki statystycznej i elektromagnetyzmu - doprowadziło do przewidywań diametralnie różnych od faktycznie obserwowanych własności promieniowania gorących ciał.

Zagadka ciała doskonale czarnego

Aby wyciągnąć tego rodzaju wnioski, teoretycy, jak zwykle w podobnych sytuacjach, wykorzystali wymyślony idealny model „doskonałego” pochłaniacza (iżk również emitera) promieniowania. Taki obiekt jest zwykle zwany ciałem doskonale czarnym, ponieważ pochłania on wszelkie padające nań promieniowanie. Nazwa jest jednak dosyć niefortunna, gdyż okazuje się, że ciało doskonale czarne jest także najbardziej wydajne w przetwarzaniu energii cieplnej w promieniowanie elektromagnetyczne - ciało „czarne” może równie dobrze być rozgrzane do „czerwoności” lub do „białości”, a powierzchnia Słońca w pewnym sensie zachowuje się jak ciało doskonale czarne. W przeciwieństwie do wielu innych wyidealizowanych koncepcji teoretyków, ciało doskonale czarne można łatwo wykonać w laboratorium. Wystarczy wziąć wydrążoną kulę albo zamkniętą z obu końców rurkę i zrobić mały otwór w jej ścianie. Jakiegokolwiek promieniowanie, które wpadnie do środka przez ten otwór, zostanie uwięzione wewnątrz i będzie się odbijać od ściany tak długo, aż zostanie przez nią pochłonięte. Jest bardzo mało prawdopodobne, żeby udało mu się uciec z powrotem, więc otwór w ścianie działa jak ciało doskonale czarne. Tej realizacji modelu zjawisko zawdzięcza inną, niemiecką nazwę: promieniowanie wnetkowe.

Interesujące w tym wszystkim jest to, co się dzieje, gdy ciało doskonale czarne jest podgrzewane. Podobnie jak pogrzebacz, z początku robi się ciepłe, a w miarę dalszego rozgrzewania zaczyna świecić - najpierw na czerwono, a potem na białą, zależnie od temperatury. Widmo emitowanego promieniowania (czyli ilość promieniowania przypadająca na każdą długość fali) można badać w laboratorium, obserwując to, co wychodzi z małej dziurki w ścianie gorącego pojemnika. Łatwo zaobserwować, że widmo to zależy wyłącznie od temperatury ciała doskonale czarnego. Odrobina promieniowania przypada na bardzo małe długości fali (wysokie częstotliwości), odrobina na bardzo duże długości fali, a większość energii przypada na jakiś środkowy przedział częstotliwości. W miarę rozgrzewania się ciała maksimum widma (czyli ta

długość fali, na którą przypada najwięcej emitowanej energii) przesuwają się w stronę krótszych fal (od podczerwonych, poprzez czerwone, niebieskie, do ultrafioletu), ale zawsze krzywa opada raptownie dla bardzo krótkich fal. Te wyniki doświadczalne, uzyskane w ciągu dziewiętnastego stulecia, okazały się sprzeczne z teorią.

Choć może się to wydawać dziwne, z teorii klasycznej wynika, że wypełniona promieniowaniem wnęka powinna emitować nieskończoną ilość energii na najkrótszych długościach fal. Inaczej mówiąc, zamiast obserwowanego maksimum energii dla pewnej skończonej długości fali i spadku do zera energii dla najmniejszych długości pomiarów powinny dać nieskończoną wartość przy przejściu do zerowej długości fali. Obliczenia były oparte na dosyć naturalnym założeniu, że fale elektromagnetyczne we wnętrzu mogą być traktowane w ten sam sposób co drgania napiętej struny, na przykład struny skrzypiec, oraz że mogą istnieć fale o dowolnej długości lub częstotliwości. Ze względu na istnienie bardzo wielu częstotliwości (fizycy mówią: wielu „modów drgań”) dla znalezienia ogólnej formuły opisującej promieniowanie (czyli fale) we wnętrzu trzeba użyć praw mechaniki statystycznej obowiązującej w świecie cząstek. Prowadzi to wprost do konkluzji, że energia wypromieniowywana przy danej częstotliwości jest proporcjonalna do tej częstotliwości. Częstotliwość jest proporcjonalna do odwrotności długości fali, czyli bardzo krótkie fale mają bardzo wysokie częstotliwości. Zatem każde ciało doskonale czarne powinno być źródłem olbrzymich ilości promieniowania o bardzo wysokich częstotliwościach, w zakresie ultrafioletu i powyżej, z coraz większą energią. Ten wniosek nosi nazwę katastrofy ultrafioletowej i pokazuje, że coś musi być nie w porządku z założeniami, które doń doprowadziły.

Jednak nie wszystko stracone. Po drugiej stronie krzywej, dla niskich częstotliwości, wyniki obserwacji zgadzają się bardzo dobrze z przewidywaniami klasycznej teorii, znanej pod nazwą prawa Rayleigha-Jeansa. Klasyczna teoria okazuje się więc przynajmniej w połowie poprawna. Pozostaje zagadka, dlaczego obserwowana energia drgań przy wysokich częstotliwościach nie jest bardzo duża, lecz przeciwnie - spada do zera, gdy częstotliwość promieniowania rośnie.

Zagadka ta w ostatniej dekadzie dziewiętnastego wieku była przedmiotem zainteresowania wielu fizyków, m.in. Maxa Plancka. Był to uczyony niemiecki o raczej konserwatywnym usposobieniu, dokładny i pracowity, ale bez skłonności do rewolucyjnych rozwiązań. Głównym obszarem jego zainteresowań była termodynamika, w ramach której miał nadzieję znaleźć wyjaśnienie problemu katastrofy ultrafioletowej. W późnych latach dziewięćdziesiątych znane były dwa przybliżone równania opisujące widmo promieniowania ciała doskonale czarnego. Dla dużych długości fal sprawdzało się prawo Rayleigha-Jeansa, a Wilhelm Wien podał wzór, który w przybliżeniu zgadzał się z danymi doświadczalnymi dla małych długości fal, a także empiryczną regułę, pozwalającą „przewidzieć” długość fali, dla której krzywa osiągała maksimum w danej temperaturze. Planck chciał zbadać, jak małe elektryczne oscylatory powinny emitować i pochłaniać fale elektromagnetyczne. Było to podejście odmienne od tego, które w 1900 roku zastosował Rayleigh i nieco później Jeans, ale dało w rezultacie standardową krzywą wraz z katastrofą ultrafioletową. W latach 1895--1900 Planck pracował intensywnie nad tym problemem,

w wyniku czego opublikował wiele ważnych artykułów dotyczących związków między termodynamiką i elektrodynamiką; nie rozwiązał jednak kwestii widma promieniowania ciała doskonale czarnego. Wyjście z impasu nastąpiło w roku 1900, bynajmniej nie dzięki logicznej, wnikliwej i spokojnej analizie, ale w wyniku aktu desperacji. Do sukcesu przyczynił się też szczęśliwy przypadek, wynikający z niezrozumienia przez Plancka jednego z narzędzi matematycznych, które wykorzystał. Nikt dzisiaj nie może być absolutnie pewien, co kierowało Planckiem, gdy uczynił ten rewolucyjny krok, który w prostej linii doprowadził do powstania mechaniki kwantowej. Martin Klein z Uniwersytetu Yale, historyk specjalizujący się w dziejach fizyki, próbował odtworzyć role odegrane przez Plancka i Einsteina przy narodzinach mechaniki kwantowej. Przekonująco umieszczając ich odkrycia w historycznym kontekście, Klein stworzył obraz na tyle autentyczny, na ile było to możliwe na podstawie istniejących źródeł. Pierwszy krok, w lecie 1900 roku, Planck zawdzięczał swej doskonałej intuicji fizyka oraz znajomości fizyki matematycznej. Zdał sobie sprawę, że dwa niekompletne opisy widma promieniowania ciała doskonale czarnego można połączyć w jedną prostą matematyczną formułę opisującą całą krzywą. Stosując trochę matematycznej żonglerki, Planck połączył prawo Wiena i prawo Rayleigha-Jeansa i stworzył pomost między krótko- i długofalowym obszarem widma. Był to wielki sukces - wzór Plancka zgadzał się doskonale z wynikami obserwacji promieniowania ciała doskonale czarnego. Jednakże w odróżnieniu od obu wyjściowych teorii - prawo Plancka nie miało podstaw fizycznych. Wien i Rayleigh, a nawet Planck, przez poprzednie cztery lata budowali swoje teorie i wyprowadzili swoje wzory na podstawie rozsądnych fizycznych przesłanek. Planck wyciągnął swój wzór „z kapelusza”. Wzór zgadzał się z danymi doświadczalnymi, ale nikt nie rozumiał, jakie fizyczne przesłanki leżą u jego podstawy. Okazało się, że przesłanki nie są bynajmniej „rozsądne”.

Niechciana rewolucja

Wzór Plancka został ogłoszony na spotkaniu Berlińskiego Towarzystwa Fizycznego w październiku¹⁰ 1900 roku. W ciągu następných dwóch miesięcy Planck był całkowicie pochłonięty próbami znalezienia fizycznych podstaw dla nowo odkrytego prawa - próbował dopasować różne kombinacje fizycznych założeń do matematycznej formuły. Znacznie później Planck wspominał, że był to okres najbardziej intensywnej pracy w jego życiu. Po wielu nieudanych próbach pozostała tylko jedna, niezbyt sympatyczna możliwość.

Przedstawiłem Plancka jako fizyka o konserwatywnych poglądach. W swoich wcześniejszych pracach był on przeciwny hipotezie cząsteczkowej, a szczególną niechęcią darzył - wprowadzoną do termodynamiki przez Boltzmann'a - statystyczną interpretację wielkości zwanej entropią. Entropia jest kluczowym pojęciem w fizyce, w fundamentalny sposób związanym z pojęciem upływu czasu. Aczkolwiek proste prawa mechaniki - prawa Newtona - są całkowicie odwracalne względem czasu, wiemy, że w rzeczywistości czas nie jest odwracalny. Pomyślmy o rzuconym kamieniu. Gdy uderzy on o powierzchnię ziemi, jego energia kinetyczna zamieni się w ciepło. Ale

¹⁰ Wszystkie inne źródła mówią, że w grudniu (przyp. tłum.).

gdy identyczny kamień położymy na ziemi i ogrzejemy do tej samej temperatury, bynajmniej nie uniesie się w górę. Dlaczego nie? W przypadku spadającego kamienia ruch uporządkowany (wszystkie atomy i cząsteczki spadające w tym samym kierunku) jest zamieniony w ruch nie uporządkowany (wszystkie atomy i cząsteczki zderzające się energicznie, lecz chaotycznie). To zgadza się z prawem natury mówiącym, że nieporządek zawsze rośnie, a tak rozumiany nieporządek jest utożsamiany z entropią. To prawo natury nazywa się drugą zasadą termodynamiki, i mówi, że procesy w przyrodzie zawsze przebiegają w kierunku wzrostu nieporządku, albo inaczej - że entropia zawsze rośnie. Jeśli dostarczymy kamieniowi nie uporządkowanej energii cieplnej, to nie będzie on w stanie użyć tej energii do stworzenia uporządkowanego ruchu wszystkich swoich cząsteczek w jednym kierunku, tak, aby wykonać ruch w górę.

A może będzie to możliwe? Boltzmann wprowadził tu pewną zmianę. Powiedział, że tak rzadkie zjawisko może się zdarzyć, aczkolwiek jest bardzo mało prawdopodobne. Na tej samej zasadzie w wyniku przypadkowych ruchów cząsteczek powietrza, może się zdarzyć, że całe powietrze w pokoju znajdzie się nagle w czterech kątach (musi być więcej niż jeden kąt, ponieważ cząsteczki poruszają się w trójwymiarowej przestrzeni). Prawdopodobieństwo takiego zdarzenia jest tak małe, że można je zignorować. Planck występował przeciwko tej statystycznej interpretacji długo i zdecydowanie, zarówno publicznie, jak i w korespondencji z Boltzmannem, uważając, że druga zasada termodynamiki obowiązuje w sposób absolutny, entropia zawsze rośnie, a prawdopodobieństwo nie ma z tym nic wspólnego. Nietrudno sobie wyobrazić, jak Planck musiał się czuć, gdy pod koniec roku 1900, wyczerpawszy wszystkie inne możliwości, niechętnie zastosował statystyczną wersję termodynamiki do swoich obliczeń widma ciała czarnego i odkrył, że wszystko się zgadza. Ironią tej sytuacji dodatkowo powiększa fakt, że Planck, nie będąc zbyt dobrze obeznany z równaniami Boltzmann'a, zastosował je niekonsekwentnie i wprawdzie doszedł do dobrego wzoru, ale błędną drogą. Doniosłość odkrycia Plancka stała się oczywista dopiero, gdy temat ten podjął Einstein.

Należy podkreślić, że potwierdzenie przez Plancka słuszności statystycznej interpretacji termodynamiki Boltzmann'a było samo w sobie olbrzymim krokiem naprzód. Nikt już nie wątpił, że wzrost entropii, aczkolwiek bardzo prawdopodobny, nie może być uważany za całkowicie pewny. Ma to interesujące implikacje w kosmologii, nauce o wszechświecie, gdzie mamy do czynienia z olbrzymimi obszarami przestrzeni i czasu. Im większy obszar, tym większa szansa, że w jakimś miejscu w jakiejś chwili mogą się w nim wydarzyć mało prawdopodobne zdarzenia. Wprawdzie wszechświat jako całość generalnie robi wrażenie dosyć uporządkowanego, ale jest możliwe (aczkolwiek wciąż mało prawdopodobne), że jest on tylko czymś w rodzaju statystycznej fluktuacji termodynamicznej, czymś w rodzaju kosmicznej czkawki, w wyniku której powstał powoli zanikający obszar o niskiej entropii. Jednakże „pomyłka” Plancka ujawniła jeszcze coś, i to coś bardziej fundamentalnego na temat natury wszechświata.

Statystyczne podejście do termodynamiki w ujęciu Boltzmanna polegało na dzieleniu energii na małe porcje i traktowaniu tych porcji jako rzeczywistych wielkości, które mogą wystąpić w równaniach na prawdopodobieństwa, po czym ponownie dodane (scałkowane) dają całkowitą energię - w tym wypadku energię promieniowania ciała doskonale czarnego. Studiując tę procedurę, Planck zorientował się, że właśnie znalazł poszukiwany przez siebie wzór. Matematyczna postać równania ciała doskonale czarnego pojawia się w przekształceniach, zanim ponownie scałkuje się energię w jedną wielkość ciągłą. W kontekście klasycznej fizyki wykorzystanie równania w tej postaci było całkowicie nieuzasadnionym i bardzo drastycznym posunięciem.

Każdy dobry „klasyczny” fizyk wykonałby końcowy etap całkowania, próbując otrzymać wzór na promieniowanie ciała doskonale czarnego z równań Boltzmanna. Einstein później udowodnił, że połączenie porcji energii w jedną całość prowadzi do katastrofy ultrafioletowej. W istocie, Einstein wykazał, że każda klasyczna procedura prowadzi w sposób nieunikniony do tejże katastrofy. Tylko dzięki temu, że Planck z góry znał odpowiedź, zatrzymał się tuż przed ostatnim, narzucającym się etapem klasycznej procedury. W rezultacie musiał wyjaśnić przyczynę, dla której energia promieniowania elektromagnetycznego dzieli się na niepodzielne porcje. Planck zinterpretował to jako właściwość elektrycznych oscylatorów, które znajdują się wewnątrz atomów, a polegającą na tym, że mogą one emitować lub pochłaniać energię w niepodzielnych dawkach, zwanych kwantami. Zamiast dzielić energię na wiele nieskończenie małych porcji, można ją podzielić między oscylatory na skończoną liczbę kawałków, a energia E jednego kawałka musi być związana z częstotliwością (oznaczoną grecką literą ν) zgodnie ze wzorem

$$E = h\nu,$$

gdzie h jest nową stałą, zwaną obecnie stałą Plancka.

Co to jest h ?

Nietrudno zrozumieć, w jaki sposób procedura ta rozwiązuje problem katastrofy ultrafioletowej. Dla bardzo dużych częstotliwości energia potrzebna do wyemitowania jednego kwantu promieniowania jest bardzo duża i już bardzo mała liczba oscylatorów będzie miała tak wielką energię (zgodnie ze statystycznym podejściem Boltzmanna), zatem powstanie tylko kilka wysokoenergetycznych kwantów. Dla bardzo małych częstotliwości (dużych długości fal) kwantów jest bardzo wiele, ale każdy ma tak małą energię, że nawet dodane razem są mało znaczące. Tylko w zakresie średnich częstotliwości znaczna liczba oscylatorów wysyła energię w średniej wielkości porcjach, co łącznie daje maksimum krzywej promieniowania. Odkrycie Plancka, ogłoszone w grudniu 1900 roku, przyniosło jednak więcej pytań niż odpowiedzi i w sumie nie wywołało burzy w świecie fizyków. Jego publikacje z teorii kwantów nie są bynajmniej jasne (co zapewne było spowodowane przez niezbyt przejrzysty sposób, w jaki Planck był zmuszony wprowadzić statystykę do swojej ukochanej termodynamiki). Większość fizyków, spośród tych, którzy znali prace Plancka, uważała jego równanie za matematyczny chwyt, za pozbawiony fizycznego znaczenia mechanizm usuwania katastrofy ultrafioletowej. Z całą pewnością sam Planck był zakłopotany. W pisany w 1931 roku

liście do Roberta Williama Wooda tak opisał swoją pracę z 1900 roku: „Mógłbym określić całą tę procedurę jako akt rozpaczny [...] teoretyczna interpretacja musiała się znaleźć za wszelką cenę, jakakolwiek miałyby ona być”¹¹. Planck zdawał sobie sprawę, że natknął się na coś bardzo istotnego. Syn Plancka wspominał wiele lat później (wedle przekazu Heisenberga), że ojciec, w trakcie spaceru przez Grünewald, na przedmieściach Berlina, tłumaczył mu, że to odkrycie może okazać się równie doniosłe jak odkrycia Newtona¹². W pierwszych latach dwudziestego wieku fizycy byli zajęci nowymi odkryciami związanymi z promieniowaniem atomów, w związku z czym nie zwrócili szczególnej uwagi na „matematyczny chwyt” Plancka, który dopiero w 1918 roku otrzymał Nagrodę Nobla, po bardzo długim czasie w porównaniu z tempem, w jakim swoje nagrody odebrali małżonkowie Curie czy Rutherford. (Częściowo dlatego, że uznanie odkrycia teoretycznego zawsze wymaga więcej czasu; nowa teoria nie jest tak namacalna jak nowa cząstka albo promienie X, musi wytrzymać próbę czasu i uzyskać potwierdzenie eksperymentalne, zanim zostanie w pełni uznana.) Ponadto pewna własność nowej stałej h była dosyć frapująca. Stała ta ma bardzo małą wartość, bo $6,6 \times 10^{-34}$ [dżul x sekunda], ale nie to jest zaskakujące, gdyż gdyby stała h była większa, to jej obecność zostałaby zauważona wcześniej, zanim fizycy zaczęli sobie łamać głowy nad zagadką ciała doskonale czarnego. Bardziej interesujący jest wymiar stałej h . Jest on równy energii (mierzonej w dżulach) mnożonej przez czas (w sekundach). Jednostkę tę nazywamy działaniem. W klasycznej fizyce działanie właściwie nie występuje - nie ma w niej „zasady zachowania działania”, którą można by postawić obok zasady zachowania energii czy masy. Jednak działanie ma jedną szczególną właściwość. Podobnie jak dla entropii - działanie jest stałe dla wszystkich obserwatorów we wszystkich punktach przestrzeni i czasu. Działanie jest wielkością czterowymiarową, czego znaczenie uwidoczniło się dopiero po odkryciu przez Einsteina teorii względności.

Ponieważ Einstein jest następną postacią na kwantowo-mechanicznej scenie, warto w tym miejscu uczynić małą dygresję, aby zobaczyć, co to znaczy, że jakaś wielkość jest czterowymiarowa. Szczególna teoria względności traktuje trzy wymiary przestrzenne oraz jednowymiarowy czas jako czterowymiarową całość, przestrzenno-czasowe kontinuum. Obserwatorzy poruszający się z różnymi prędkościami widzą niektóre rzeczy inaczej - na przykład podaliby inną długość mijającego ich pręta. Ale pręt (i każdy inny przedmiot) można uważać za obiekt istniejący w czterech wymiarach, a jego ruch „wzdłuż” czasu wyznacza czterowymiarową powierzchnię - hiperprostokąt, którego wysokość jest równa długości pręta, a szerokość odpowiada ilości czasu, który upływa w trakcie ruchu pręta. „Powierzchnia” tego prostokąta jest mierzona w jednostkach długości pomnożonej przez czas i jest ona jednakowa dla wszystkich mierzących ją obserwatorów, mimo że ich pomiary dla długości i dla czasu z osobna mogą się ze sobą nie zgadzać. Na tej samej zasadzie działanie (energia razy czas) jest czterowymiarowym odpowiednikiem energii i jest jednakowe dla wszystkich obserwatorów, mimo że nie zgadzają się oni co do wielkości energii i czasu z osobna. W szczególnej teorii względności odpowiednikiem

¹¹ J. Mehra, H. Reichenberg, *The Historical Development of Quantum Theory*, t. 1.

¹² W. Heisenberg, *Physics and Philosophy*, s. 35.

zasady zachowania energii jest zasada zachowania działania i odgrywa ona równie ważną rolę. Stała Plancka początkowo sprawiała dziwne wrażenie tylko dlatego, że została odkryta przed teorią względności.

Powiązanie to odzwierciedla holistyczną naturę fizyki. Spośród trzech wielkich odkryć Einsteina z 1905 roku szczególnie teoria względności wydaje się zasadniczo różna od obu pozostałych, czyli teorii ruchów Browna i efektu fotoelektrycznego. Jednakże wszystkie one są wbudowane w strukturę fizyki teoretycznej i, niezależnie od popularności, jaką cieszy się teoria względności, największym osiągnięciem Einsteina były jego prace o teorii kwantów, które wzięły swój początek od prac Plancka i doprowadziły do wyjaśnienia efektu fotoelektrycznego.

Rewolucyjnym aspektem prac Plancka był fakt, że ukazały one ograniczenia fizyki klasycznej. Nie jest istotne, na czym te ograniczenia polegały. Wystarczyło wykazać, że istnieją zjawiska, których nie da się wytłumaczyć na gruncie klasycznych teorii opartych na prawach Newtona, aby ogłosić nową erę w fizyce. Oryginalne prace Plancka były jednakże znacznie bardziej ograniczone w formie, niż to może się wydawać na podstawie niektórych współczesnych przekazów. Istnieje literatura przygodowa, w której pod koniec każdej opowieści bohater cudem ratuje się z opresji, a komentarz brzmi: „Jeden krok i Jack był wolny”. Wiele popularnych przekazów o początkach mechaniki kwantowej powiela ten schemat. „Pod koniec dziewiętnastego wieku klasyczna fizyka znalazła się w sytuacji bez wyjścia. Jeden krok, Planck wynalazł kwant i fizyka była wolna”. Nic bardziej odległego od prawdy. Planck tylko zasugerował, że elektryczne oscylatory wewnątrz atomów mogą być skwantowane. Chodziło mu o to, że mogą one emitować paczki energii o określonych rozmiarach, gdyż jakaś wewnętrzna przyczyna nie pozwala im absorbować ani emitować „pośrednich” ilości energii.

Na tej samej zasadzie działa bankomat w moim londyńskim banku. Gdy wsunę kartę magnetyczną, maszyna wyda mi taką ilość pieniędzy, jakiej zażądam, pod warunkiem, że będzie to wielokrotność £5 (pięciu funtów). Bankomat nie potrafi wydawać pośrednich ilości (i nie potrafi wydać mniej niż £5), ale to nie znaczy, że takie pośrednie ilości, na przykład £8,47, nie istnieją. Planck bynajmniej nie sugerował, że promieniowanie jest skwantowane i zawsze z ostrożnością traktował głębsze konsekwencje teorii kwantów. W późniejszych latach Planck jeszcze kilkakrotnie przyczynił się do dalszych postępów teorii kwantowej, ale większość swego aktywnego życia spędził, próbując pogodzić nowe idee z fizyką klasyczną. To nie znaczy, że zmienił zdanie, raczej należałoby powiedzieć, iż nigdy nie zrozumiał, jak bardzo jego równanie odbiegało od podstaw klasycznej fizyki, zwłaszcza że wyprowadził je przez połączenie dwóch klasycznych teorii - termodynamiki i elektrodynamiki. Zamiast się wycofać, co byłoby dosyć naturalne dla fizyka wychowanego wyłącznie na fizyce klasycznej, Planck próbował znaleźć pomost między klasyczną i kwantową teorią, co i tak stanowiło olbrzymie odstępstwo od wyznawanych przez niego zasad. Jednak prawdziwy postęp dokonał się za sprawą nowego pokolenia fizyków, mniej przywiązanych do starych idei i uznanych metod, a zafascynowanych nowymi odkryciami promieniowania atomowego i szukających nowych odpowiedzi zarówno na stare, jak i na nowe pytania.

Einstein, światło i kwanty

W marcu 1900 roku Einstein skończył dwadzieścia jeden lat. Latem 1902 roku podjął pracę w szwajcarskim urzędzie patentowym. Jego naukowe zainteresowania koncentrowały się w tym okresie na termodynamice i mechanice statystycznej. Swoje pierwsze publikacje naukowe pisał w tradycyjnym stylu i dotyczyły one tych samych problemów, którymi zajmowali się fizycy z poprzedniego pokolenia. Jednak w pierwszej pracy dotyczącej promieniowania ciała doskonale czarnego oraz idei Plancka Einstein zaczął rozwijać własny styl rozwiązywania fizycznych problemów. Martin Klein pisze, że Einstein pierwszy potraktował z powagą fizyczne konsekwencje prac Plancka, traktując je nie tylko jako matematyczny chwyt¹³; upłynął zaledwie rok od uznania realnych, fizycznych podstaw równania Plancka do nowego, dramatycznego przełomu - powrotu do korpuskularnej teorii światła.

Kolejnym bodźcem dla Einsteina, jak również dla Plancka, były badania efektu fotoelektrycznego prowadzone niezależnie przez Phillipa Lenarda oraz J.J. Thomsona pod koniec dziewiętnastego wieku. Urodzony w 1862 roku w Bratysławie Lenard otrzymał w 1905 roku Nagrodę Nobla za badania promieni katodowych. W swoich eksperymentach wykazał m.in., że promienie katodowe (elektrony) mogą być wytwarzane przez światło padające na powierzchnię metalową w próżni. W jakiś sposób światło wybija elektrony z powierzchni metalu.

Lenard użył w swoich badaniach wiązek światła monochromatycznego (jednego koloru), co oznacza, że wszystkie fale w wiązce światła mają tę samą częstość. Obserwując wpływ natężenia światła na wybijane z metalu elektrony, Lenard odkrył zaskakujący efekt. Silniejsze światło (w rzeczywistości Lenard przesunął to samo źródło światła bliżej powierzchni metalu) daje więcej energii na każdy centymetr kwadratowy powierzchni metalu. Jeśli elektron otrzymuje więcej energii, to powinien zostać bardziej energicznie wybity z metalu i powinien oddalać się z większą prędkością.

Jednakże Lenard odkrył, że elektrony oddalały się od powierzchni metalu z tą samą prędkością, jeżeli długość fali światła była taka sama. Przysunięcie źródła światła bliżej powodowało zwiększenie liczby wybitych elektronów, ale każdy z nich poruszał się z taką samą prędkością, jak te, które uwolniły się przy słabszej wiązce światła o tej samej częstości. Jednak elektrony poruszały się szybciej, gdy zostało użyte źródło światła o wyższej częstości, np. ultrafioletowe zamiast niebieskiego lub czerwonego.

Istnieje bardzo proste wytłumaczenie tego zjawiska, pod warunkiem, że odrzucimy idee klasycznej fizyki, a uznamy fizyczne podstawy równań Plancka. Jak ważne są te warunki, widać z faktu, że przez pięć lat od początkowych prac Lenarda nad efektem fotoelektrycznym i po wprowadzeniu przez Plancka pojęcia kwantu nikt nie wykonał tego oczywistego kroku. W rzeczy

¹³ Por. artykuł Kleina w: G. Woolf (red.), *Some Strangeness in the Proportion*. W tym samym tomie Thomas Kuhn z MIT posuwa się jeszcze dalej niż większość autorytetów i twierdzi, że Planck „nie miał pojęcia o dyskretnym widmie energii, gdy przedstawiał swoje pierwsze wyprowadzenie prawa promieniowania ciała czarnego”, oraz że Einstein pierwszy docenił „zasadniczą rolę kwantowania w teorii ciała czarnego”. Kuhn twierdzi też, że „to Einstein, a nie Planck po raz pierwszy skwantował oscylator Plancka”. Spór ten możemy pozostawić akademikom, ale nie ma wątpliwości, że Einstein odegrał kluczową rolę w rozwoju teorii kwantowej.

samej Einstein jedynie zastosował równanie $E = hv$ do promieniowania elektromagnetycznego zamiast do oscylatorów wewnątrz atomu i na tej podstawie orzekł, że światło nie jest ciągłą falą, za jaką było uważane przez sto lat, lecz porusza się w określonych pakietach, zwanych kwantami. Światło o określonej częstotliwości ν , czyli określonego koloru, porusza się w paczkach o takiej samej energii E . Za każdym razem, gdy jeden z tych kwantów trafi w elektron, przekazuje mu taką samą ilość energii i tym samym nadaje mu taką samą prędkość. Większe natężenie światła znaczy po prostu więcej kwantów światła (obecnie nazywamy je fotonami) o tej samej energii każdy, ale zmiana koloru światła zmienia jego częstotliwość, czyli zmienia ilość energii, którą niesie każdy foton.

Za tę właśnie pracę Einstein otrzymał w 1921 roku Nagrodę Nobla. Jak zwykle teoretyczne odkrycie musiało poczekać na pełną aprobatę. Koncepcja fotonu nie od razu zyskała uznanie i chociaż wyniki eksperymentów Lenarda ogólnie zgadzały się z teorią, upłynęło ponad dziesięć lat, zanim związek między prędkością elektronów i długością fali światła został przetestowany i udowodniony. Dokonał tego amerykański fizyk, Robert Millikan, który także bardzo dokładnie zmierzył wartość stałej Plancka h . W 1923 roku Millikan otrzymał Nagrodę Nobla za dokładne pomiary ładunku elektronu.

Tak więc Einstein miał bardzo pracowity rok. Jedna praca została uhonorowana Nagrodą Nobla; w drugiej udowodnił ostatecznie istnienie atomu; z trzeciej narodziła się teoria względności, która przyniosła jej autorowi największy rozgłos. Poza tym, jakby od niechcenia, w tym samym 1905 roku napisał kolejną niewielką pracę dotyczącą rozmiarów molekuł. Publikację tę złożył jako pracę doktorską na uniwersytecie w Zurychu i w styczniu 1906 roku otrzymał doktorat. Tytuł doktora nie był w tamtych czasach tak niezbędny do prowadzenia aktywnej działalności naukowej jak obecnie, jednak wydaje się nadzwyczajne, że te trzy wybitne publikacje z 1905 roku zostały stworzone przez człowieka, który przed swoim nazwiskiem mógł napisać jedynie „Herr”.

W ciągu kilku następujących lat Einstein kontynuował pracę nad zastosowaniem idei kwantu w innych dziedzinach fizyki. Zdołał m.in. wyjaśnić zagadkę dotyczącą teorii ciepła właściwego (ciepło właściwe jakiejś substancji to ilość energii konieczna do ogrzania ustalonej masy tej substancji o jeden stopień; zależy ono od rodzaju drgań, jakim podlegają atomy wewnątrz substancji - drgania te okazały się skwantowane). Jest to mniej spektakularna dziedzina fizyki, często pomijana w opisach dokonań Einsteina, ale to właśnie kwantowa teoria materii pierwsza zdobyła uznanie, wcześniej niż kwantowa teoria promieniowania. Wielu fizyków starej daty zaczęło traktować idee kwantów poważniej właśnie pod wpływem kwantowej teorii materii. Einstein udoskonalił kwantową teorię promieniowania w ciągu kilku lat poprzedzających rok 1911, wykazując, że kwantowa struktura promieniowania jest nieuniknioną konsekwencją równania Plancka, i przekonując oporny na nowości świat nauki, że jedynym sposobem lepszego zrozumienia światła jest połączenie teorii falowej i teorii cząsteczkowej, które konkurowały ze sobą od siedemnastego wieku. Około 1911 roku zainteresowania Einsteina uległy ponownej zmianie. Przekonał się, że kwanty rzeczywiście istnieją, a ponieważ tylko jego własne przekonania były dlań istotne, zajął się teorią grawitacji. W latach 1911-1916 stworzył ogólną teorię względności - swoje największe dzieło. Kwantowa natura

światła została ostatecznie potwierdzona dopiero w 1923 roku, co zainicjowało dyskusję o cząstkach i falach i w konsekwencji doprowadziło do przekształcenia teorii kwantowej w jej współczesną wersję - mechanikę kwantową, o czym będzie jeszcze mowa. Pierwsze owoce teorii kwantowej pojawiły się w ciągu dekady, którą Einstein spędził, pracując nad innymi zagadnieniami. W wyniku połączenia idei kwantu z modelem atomu Rutherforda duński fizyk, Niels Bohr, pracujący uprzednio z Rutherfordem w Manchesterze, stworzył nowy model atomu, który położył kres wszelkim wątpliwościom co do przydatności teorii kwantowej do opisu mikroświata.

Rozdział czwarty

Atom Bohra

Okolo 1912 roku klocki atomowej układanki były gotowe do połączenia w jedną całość. Za sprawą Einsteina idea kwantu zyskała ogólne uznanie, aczkolwiek pojęcie kwantu światła - fotonu - nie było jeszcze w pełni zaakceptowane. Rozszerzając analogię z bankomatem, Einstein mógłby powiedzieć, że energia rzeczywiście istnieje tylko w porcjach o określonej wielkości - bankomat wypłaca po pięć funtów, ponieważ jest to najmniejszy istniejący banknot, a nie ze względu na kaprys konstruktora. Rutherford stworzył nowy model atomu. Jego atom miał małe jądro w środku i otaczającą je chmurę elektronów. Jednak zgodnie z zasadami klasycznej elektrodynamiki atom Rutherforda nie mógł być trwały. Rozwiązanie polegało na zastosowaniu kwantowych reguł do opisu zachowania elektronów w atomach. I raz jeszcze przełomu dokonał młody uczoney o świeżym spojrzeniu na problem - co okaże się regułą w historii rozwoju teorii kwantowej.

Niels Bohr ukończył doktorat w lecie 1911 roku, a we wrześniu tegoż roku udał się do Cambridge, aby pracować z J.J. Thomsonem w Cavendish Laboratory. Był bardzo młody i nieśmiały, niezbyt dobrze mówił po angielsku i niełatwo było mu zaaklimatyzować się w Cambridge. W czasie wizyty w Manchesterze spotkał Rutherforda, który okazał zainteresowanie pracą Bohra i zachęcił go do współpracy nad zagadką struktury atomu¹⁴. W marcu 1912 roku Bohr przeniósł się do Manchesteru, a po kolejnych sześciu miesiącach wrócił na krótko do Kopenhagi, lecz pozostał związany z grupą Rutherforda aż do 1916 roku.

Skaczące elektrony

Bohr miał jedną szczególną zaletę, która w ciągu następných dziesięciu, piętnastu lat okazała się niezwykle przydatna w rozwoju fizyki atomowej. Nie troszczył się mianowicie o wyjaśnianie szczegółów teorii oraz miał talent do łączenia różnych koncepcji w jeden spójny „model”, który przynajmniej z grubsza zgadzał się z wynikami eksperymentów. Gdy już miał przybliżony obraz sytuacji fizycznej, pracował nad nim dalej, aby lepiej dopasować szczegóły i dzięki temu otrzymać jeszcze lepszy model. Początkowo Bohr wyobrażał sobie atom jako miniaturowy Układ Słoneczny, w którym elektrony poruszają się po orbitach zgodnie z prawami klasycznej mechaniki i elektromagnetyzmu. Następnie uporał się z problemem spiralnego opadania elektronu na jądro i związanym z tym promieniowaniem, nakładając warunek, zgodnie z którym elektrony mogą emitować porcje energii - całe kwanty, a nie ciągle promieniowanie przewidziane przez klasyczną teorię. „Stabilnym” orbitom elektronowym odpowiadały pewne ustalone ilości energii będące wielokrotnościami podstawowego kwantu, ale nie istniały orbity pośrednie, ponieważ wymagałyby

¹⁴ Według jednej z wersji tej historii przeprowadzka Bohra do Manchesteru była rezultatem nieporozumienia między Bohrem a Thomsonem co do atomowego modelu Thomsona. Bohrowi model się nie podobał, więc J.J. Thomson spokojnie zasugerował, że osobą bardziej otwartą na idee Bohra może być Rutherford. Por. E.U. Condon, cytowany przez Maxa Jammera w *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, s. 69.

dostarczenia ułamkowych porcji energii. Naciągając nieco analogię z Układem Słonecznym można by powiedzieć, że orbity Ziemi i Marsa są stabilne, ale nie ma stabilnych orbit pomiędzy nimi. Model Bohra nie miał prawa działać. Idea orbity opiera się na fizyce klasycznej, a idea stanów elektronowych (zwanych obecnie poziomami energetycznymi), odpowiadających ustalonym porcjom energii, wywodzi się z teorii kwantów. Model złożony po części z teorii klasycznej, a po części z teorii kwantowej, nie mógł wyjaśnić, co naprawdę dzieje się wewnątrz atomu, ale był dostatecznie dobry jako punkt wyjścia do dalszych badań. W istocie, model Bohra był błędny niemal pod każdym względem, ale okazał się nieoceniony do zbudowania prawdziwej teorii kwantowej. Niestety, z powodu swojej prostoty, naturalnego połączenia aspektów klasycznych i kwantowych oraz pociągającego obrazu atomu jako miniaturowego Układu Słonecznego, model Bohra przetrwał nie tylko w tekstach popularyzatorskich, ale także w podręcznikach szkolnych, a nawet uniwersyteckich. Jeśli w szkole nauczono was czegokolwiek o atomach, jestem pewien, że poznaliście atom Bohra, niezależnie od tego, jak został nazwany. Nie będę nikogo namawiać, żeby zapomnieć to, ale musicie być świadomi, że nie wszystko było prawdą. I p o w i n n i ś c i e przestać myśleć o elektronach jako o „planetach” krążących wokół jądra - to był pierwszy pomysł Bohra, ale okazał się błędny; Elektron jest po prostu czymś, co znajduje się w pobliżu jądra, ma pewną ilość energii i pewne inne własności, natomiast porusza się w dosyć tajemniczy sposób po czym wkrótce się przekonamy.

Pierwszy wielki sukces Bohr odniósł w 1913 roku, gdy za pomocą swego modelu wyjaśnił widmo promieniowania wodoru, najprostszego atomu. Spektroskopia jako nauka narodziła się we wczesnych latach dziewiętnastego stulecia, gdy William Wollaston odkrył ciemne prążki w widmie światła słonecznego¹⁵, ale dopiero od wczesnych prac Bohra stała się narzędziem badania struktury atomu. W tym miejscu musimy odejść od idei kwantów światła Einsteina, a wrócić do klasycznej koncepcji fali elektromagnetycznej, gdyż w tego rodzaju pracy nie ma sensu myśleć o promieniowaniu inaczej niż jako o fali¹⁶.

Newton odkrył, że białe światło jest złożone ze wszystkich kolorów tęczy - inaczej mówiąc - z pełnego widma. Każdemu kolorowi odpowiada inna długość fali. Rozszczepiając białe światło przy użyciu szklanego pryzmatu rozszczepiamy widmo na fale o różnych częstościach i fale o różnych kolorach trafiają w różne miejsca ekranu lub płyty fotograficznej. Krótkofalowe niebieskie i fioletowe światło leży na jednym końcu widma optycznego, a długofalowe czerwone światło - na drugim. Widmo rozciąga się - po obu stronach - daleko poza zakres kolorów widocznych dla naszych oczu. Gdy rozszczepimy w ten sposób światło słoneczne, na tle widma pojawiają się ostre, ciemne linie w ściśle określonych miejscach, odpowiadające określonym częstościom. Jeszcze nie wiedząc, w jaki sposób te linie powstają, dziewiętnastowieczni badacze, Joseph Fraunhofer, Robert Bunsen (którego imię unieśmiertelił standardowy palnik laboratoryjny) i Gustav Kirchhoff,

¹⁵ Inne źródła podają, że linie te, zwane obecnie liniami Fraunhofera, odkrył w 1814 roku niemiecki uczoney Joseph von Fraunhofer. William Wollaston odkrył w 1801 roku istnienie promieniowania nadfioletowego, badając widmo promieniowania Słońca (przyp. tłum.).

¹⁶ Pełna teoria kwantowa mówi nam, że światło jest równocześnie i cząstką, i falą. ale jeszcze nie doszliśmy do tego etapu.

eksperymentalnie ustalili, że każdy pierwiastek wytwarza swój własny zestaw linii widmowych. Gdy dany pierwiastek (na przykład sód) zostanie ogrzany w płomieniu palnika Bunsena, zacznie świecić światłem określonego koloru (w tym wypadku światłem żółtym); światło to powstaje w wyniku silnej emisji promieniowania jako jasna linia lub linie w pewnej części widma. Gdy białe światło zostanie przepuszczone przez ciecz lub gaz zawierający ten sam pierwiastek, w widmie przechodzącego światła pojawiają się ciemne linie absorpcyjne, podobnie jak w widmie światła słonecznego, o tych samych częstościach charakterystycznych dla danego pierwiastka.

Odkrycia te pozwoliły wyjaśnić zagadkę ciemnych linii w widmie światła słonecznego. Muszą one powstawać w atmosferze Słońca, gdzie chłodniejsza warstwa materii pochłania pochodzące ze znacznie bardziej gorącej powierzchni Słońca promieniowanie, zostawiając w widmie ciemne prążki o częstościach charakterystycznych dla pierwiastków występujących w atmosferze słonecznej. Technika ta okazała się bardzo użyteczna dla chemików jako metoda identyfikacji pierwiastków występujących w związku chemicznym. Wystarczy wrzucić nieco kuchennej soli do ognia, aby pojawił się charakterystyczny żółty kolor sodowy (znany dzisiaj z sodowych lamp ulicznych). W laboratorium można zanurzyć kawałek drutu w badanej substancji, a następnie włożyć drut do płomienia lampy bunsenowskiej. Każdy pierwiastek daje swój własny zestaw linii, który nie zmienia się nawet przy zmianie temperatury płomienia (aczkolwiek może się zmienić natężenie linii). Ostrość wszystkich linii widmowych wskazuje, że każdy atom emituje lub absorbuje promieniowanie o dokładnie tej samej częstości, bez żadnych odchyień. Przez porównanie z testami w płomieniu fizycy wyjaśnili większość linii w widmie Słońca przez obecność w atmosferze Słońca pierwiastków znanych także na Ziemi. Angielski astronom Norman Lockyer (założyciel czasopisma „Nature”) zastosował tę procedurę na opak; odkrył on w widmie słonecznym linie, których nie dało się wyjaśnić obecnością żadnego znanego na Ziemi pierwiastka, wyciągnął więc wniosek, że muszą one odpowiadać nowemu pierwiastkowi, któremu dał nazwę hel. Wkrótce hel został znaleziony także na Ziemi i jego widmo okazało się dokładnie takie, jak trzeba, żeby potwierdzić (i rozślawić) hipotezę Lockyera.

Za pomocą spektroskopii astronomowie mogą badać, z czego zbudowane są odległe gwiazdy i galaktyki, a fizycy atomowi mogą badać wewnętrzną strukturę atomu.

Widmo wodoru jest szczególnie proste, co, jak obecnie wiadomo, wynika z faktu, że wodór jest najprostszym pierwiastkiem - każdy atom zawiera jeden dodatnio naładowany proton jako jądro oraz jeden ujemnie naładowany elektron związany z protonem. Linie widmowe, które stanowią unikatowy kod identyfikacyjny wodoru, zwane są obecnie liniami Balmera, od nazwiska szwajcarskiego nauczyciela Johanna Balmera, który w 1885 roku (roku urodzin Nielsa Bohra) podał równanie opisujące układ linii wodoru. Wzór Balmera wiąże częstości linii, które pojawiają się w widmie wodoru. Poczynając od częstości pierwszej linii wodoru w czerwonej części widma, wzór daje częstość następnej linii w zakresie niebieskim. Zaczynając od niebieskiej linii, otrzymujemy częstość kolejnej linii w części fioletowej widma. I tak dalej¹⁷. Tworząc swój wzór,

¹⁷ Prostsza wersja wzoru Balmera mówi, że długości fal pierwszych czterech linii wodoru można uzyskać, mnożąc stałą ($36\,456 \times 10^{-5}$) przez $9/5$, $16/12$, $25/21$ i $36/32$. W tej wersji licznik ułamka jest dany przez ciąg

Balmer znał jedynie cztery linie wodoru w widzialnej części widma, ale później zostały odkryte inne linie i dokładnie pasowały; kolejne odkrycia przyniosły więcej linii w ultrafiolecie i w podczerwieni, i wszystkie one spełniały prostą zależność Balmera. Było oczywiste, że kryje się za tym jakaś istotna właściwość atomu wodoru. Ale jaka?

W czasie, gdy na scenie nauki pojawił się Bohr, wzór Balmera był już elementem każdego kursu uniwersyteckiej fizyki i był znany każdemu fizykowi, ale z drugiej strony stanowił tylko element olbrzymiej liczby danych spektroskopowych, a Bohr nie był specjalistą w tej akurat dziedzinie. Gdy podjął pracę nad zagadką struktury atomu wodoru, bynajmniej nie zaczął od analizy wzoru Balmera, co z dzisiejszej perspektywy wydawałoby się oczywistym posunięciem. Jednak gdy kolega specjalizujący się w spektroskopii zwrócił jego uwagę na uderzającą prostotę wzoru Balmera (zwłaszcza na tle skomplikowanych widm innych pierwiastków), Bohr szybko się zorientował, że tu leży klucz do zagadki. W tym czasie, na początku 1913 roku, Bohr był już przekonany, że częścią rozwiązania problemu jest stała Plancka h , którą należy wprowadzić do równań opisujących atom. Model Rutherforda zawierał tylko dwie podstawowe stałe - ładunek elektronu e oraz masy cząstek tworzących atom. Żadna kombinacja masy i ładunku nie mogła dać wielkości o wymiarze długości, co oznaczało, że model Rutherforda nie miał „naturalnej” jednostki długości. Jednak gdy do tego wszystkiego dołoży się działanie h , można utworzyć wielkość, która ma wymiar długości i daje pojęcie o rozmiarach atomu. Wyrażenie h/me^2 ma wymiar długości i wynosi około $20 \times 10^{-10}m$, co było dostatecznie zbliżone do wyników innych badań, m.in. eksperymentów z rozpraszaniem, aby przekonać Bohra, że teoria atomu musi zawierać stałą h . Szereg Balmera uzmysłowił mu, gdzie h ma swoje miejsce.

W jaki sposób atom może wytworzyć ostrą linię widmową? Przez emisję lub absorpcję promieniowania o ściśle określonej częstotliwości ν . Energia jest związana z częstotliwością poprzez stałą Plancka ($E = h\nu$), więc jeśli elektron w atomie emituje kwant energii $h\nu$, jego własna energia musi się zmienić dokładnie o tę samą wielkość E . Bohr powiedział, że elektron pozostaje „na orbicie” wokół jądra atomowego, ponieważ nie może promieniować energii w sposób ciągły, ale może wypromieniować (lub zaabsorbować) cały kwant energii - foton - i przeskoczyć z jednego poziomu energii (jednej orbity) na inny. Ten pozornie prosty pomysł jest wielką herezją wobec klasycznych reguł. Wystarczy wyobrazić sobie Marsa, który nagle przeskakuje ze swojej orbity na orbitę Ziemi, przy okazji emitując w przestrzeń impuls energii (w tym wypadku byłaby to fala grawitacyjna), aby zdać sobie sprawę, że porównanie atomu do Układu Słonecznego jest mało adekwatne. Znacznie lepiej jest myśleć o atomie w kategoriach stanów elektronowych, którym odpowiadają różne poziomy energii.

Przeskok z jednego stanu do innego może zachodzić w obu kierunkach, zarówno w dół, jak i w górę drabiny poziomów energii. Jeżeli atom absorbuje światło, to energia kwantu jest zużyta na przeniesienie elektronu na wyższy poziom energii (na wyższy szczebel drabiny). Jeżeli następnie elektron spadnie z powrotem na poprzedni poziom, to atom wyemituje dokładnie taką samą ilość

kwadratów ($3^2, 4^2, 5^2, 6^2$), a mianownik przez różnice kwadratów ($3^2 - 2^2, 4^2 - 2^2$ itd.).

energii $h\nu$. Tajemnicza stała $36\,456 \times 10^{-5}$ we wzorze Balmera mogła być teraz wyrażona poprzez stałą Plancka, co pozwoliło Bohrowi obliczyć energie „dozwolonych” poziomów elektronowych w atomie wodoru. Doświadczalnie mierzone częstości linii promieniowania zinterpretowano jako różnice energii pomiędzy tymi poziomami energii¹⁸.

Wodór wyjaśniony

Przedyskutowawszy rezultaty swej pracy z Rutherfordem, Bohr opublikował swoją teorię w serii publikacji w 1913 roku. Teoria sprawdziła się bardzo dobrze dla wodoru i wydawało się, że można ją rozszerzyć i zastosować również do bardziej skomplikowanych atomów. We wrześniu Bohr wziął udział w osiemdziesiątym trzecim dorocznym posiedzeniu British Association for the Advancement of Science¹⁹ i przedstawił swoje wyniki przed-audytorem, w którym obecnych było wielu spośród najwybitniejszych fizyków atomowych. Referat został na ogół bardzo dobrze przyjęty, a James Jeans (współodkrywca prawa Rayleigha-Jeansa) określił teorię Bohra jako pomysłową, sugestywną i przekonującą; dzięki posiedzeniu nawet nieliczni niedowiarkowie (m.in. J.J. Thomson) przynajmniej dowiedzieli się o wynikach prac Bohra.

Trzydzieści lat po desperackim wprowadzeniu przez Plancka kwantu do teorii światła Bohr wprowadził kwant do teorii atomu. Do powstania prawdziwej teorii kwantowej potrzeba było następnych trzynastu lat mozolnego postępu - jeden krok w tył na każde dwa kroki w przód, a czasem dwa kroki w tył na każdy krok do przodu, który wydawał się ruchem we właściwym kierunku. Atom Bohra był hybrydą pomysłów kwantowych i klasycznych, pomieszanych ad hoc dla utrzymania modelu. Teoria przewidywała znacznie więcej linii widmowych, niż rzeczywiście można zobaczyć, obserwując promieniowanie różnych atomów, więc konieczne było wprowadzenie arbitralnych reguł „zakazujących” niektórych przejść pomiędzy różnymi stanami atomu. Dla dopasowania modelu do danych doświadczalnych różnym stanom zostały przypisane nowe własności - liczby kwantowe - również ad hoc, bez trwałej teoretycznej podstawy, która by tłumaczyła, dlaczego są one konieczne albo dlaczego niektóre przejścia są zakazane. W tym stanie rzeczy, w rok po ogłoszeniu przez Bohra jego pierwszego modelu, porządek europejski runął na skutek wybuchu pierwszej wojny światowej.

Jak w każdej innej dziedzinie życia, wybuch wojny nieodwracalnie zmienił także oblicze nauki, która już nigdy nie miała odzyskać swego przedwojennego stylu. Tradycyjna łatwość, z jaką naukowcy mogli przed wojną nawiązywać kontakty, przemieszczać się z ośrodka do ośrodka i z

¹⁸ Jednostki energii, których używamy na co dzień, są niezbyt wygodne w pracy z elektronami w atomach, gdyż są o wiele za duże. Znacznie lepszą jednostką jest wprowadzony w 1912 roku elektronowolt (eV), równy ilości energii, którą elektron zyskuje przy przejściu przez różnicę potencjału jednego wolta. W przeliczeniu na bardziej znane jednostki elektronowolt wynosi $1,602 \times 10^{-19}$ dżula, przy czym jeden wat wynosi jeden dżul na sekundę. Typowa żarówka zużywa około 100 watów, co w jednostkach atomowych wynosi $6,24 \times 10^{20}$ elektronowoltów na sekundę. Znacznie większe wrażenie wywołam, gdy powiem, że moja lampa zużywa sześć i ćwierć setki miliardów miliardów elektronowoltów na sekundę niż trywialne sto watów. Energie przejść elektronowych w atomach, odpowiedzialnych za linie widmowe, są rzędu kilku eV - do wyrzucenia elektronu poza atom wodoru wystarczy raptem 13,6 eV. Energie cząstek wytwarzanych w procesach radioaktywnych sięgają milionów eV (MeV).

¹⁹ British Association for the Advancement of Science - Brytyjskie Stowarzyszenie Popierania Postępu Nauk (przyp. tłum.).

kraju do kraju oraz wymieniać doświadczenia i informacje, już nigdy nie powróciła. Nawet po zakończeniu wojny niektórzy naukowcy mieli trudności z komunikowaniem się z kolegami z różnych stron świata. Wojna miała także bezpośredni wpływ na badania naukowe prowadzone w czołowych ośrodkach, gdzie fizyka poczyniła tak wielkie postępy we wczesnych latach dwudziestego stulecia. W krajach bezpośrednio zaangażowanych w działania wojenne młodzi ludzie - zamiast kontynuować idee Bohra - poszli na front, zostawiając w laboratoriach przedstawicieli starszego pokolenia (np. Rutherforda). Wielu spośród tych młodych zginęło. Praca naukowa w krajach neutralnych również ucierpiała, aczkolwiek niektórzy naukowcy być może skorzystali na nieszczęściu innych. Bohr został mianowany wykładowcą fizyki (Reader in Physics) w Manchesterze; a w Getyndze Duńczyk, Peter Debye, wykonał ważne badania struktury kryształów przy wykorzystaniu promieni X. To właśnie Holandia i Dania pozostały oazami nauki. Bohr wrócił do Danii w 1916 roku jako profesor fizyki teoretycznej w Kopenhadze, a następnie w 1920 roku założył instytut badawczy, który dziś nosi jego imię. Wiadomości od niemieckiego uczonego, Arnolda Sommerfelda (który w znacznym stopniu przyczynił się do udoskonalenia modelu Bohra, zwanego nawet niekiedy modelem Bohra-Sommerfelda), mogły być przekazywane do neutralnej Danii, skąd Bohr przesyłał je Rutherfordowi w Anglii. Aczkolwiek na znacznie mniejszą skalę, badania naukowe czyniły pewne postępy nawet w czasie wojny.

Przez wiele lat po wojnie nie zapraszano na międzynarodowe konferencje niemieckich i austriackich naukowców. Rosja była pogrążona w rewolucyjnym chaosie. Całe pokolenie młodych ludzi było stracone dla nauki, a jej międzynarodowy charakter uległ znacznemu ograniczeniu. Dalszy rozwój teorii - od ustanowionego przez Bohra półmetka (którego model został, w wyniku wyęźzonych wysiłków wielu uczonych, udoskonalony i doprowadzony do nadzwyczaj efektywnej, aczkolwiek niespójnej, postaci) do pełnej glorii ostatecznej wersji mechaniki kwantowej - spadł na barki przedstawicieli następnej generacji. Ich nazwiska wpisały się na trwałe w kanon nowoczesnej fizyki: Werner Heisenberg, Paul Dirac, Wolfgang Pauli, Pascual Jordan i wielu innych przedstawicieli pierwszego pokolenia fizyków kwantowych urodzonych w pierwszych latach po przełomowym odkryciu Plancka (Pauli - 1900 r., Heisenberg - 1901 r., Dirac i Jordan - 1902 r.) i rozpoczynających karierę naukową w latach dwudziestych. Przywiązanie do klasycznej fizyki i potrzeba zachowania ciągłości klasycznych idei były dla nich znacznie mniejszą przeszkodą niż dla poprzedniego pokolenia. Nawet uczonego o tak błyskotliwym umyśle jak Bohr nie mógł się uwolnić od półśrodków podtrzymujących klasyczne idee w teorii atomu. Nie jest zapewne przypadkiem, że od odkrycia przez Plancka równania ciała doskonale czarnego do pełnego rozkwitu mechaniki kwantowej upłynęło dokładnie dwadzieścia sześć lat, czyli czas potrzebny nowemu pokoleniu na osiągnięcie pełnej aktywności zawodowej. To pokolenie otrzymało w spadku od swoich starszych kolegów, nadal w pełni aktywnych naukowo, dwie wielkie idee, nie licząc stałej Plancka. Pierwszą był atom Bohra, stanowiący jednoznaczny dowód, że każda poprawna teoria procesów atomowych musi obejmować pojęcie kwantu. Druga idea przyszła od jedyne go uczonego owych czasów, który nigdy nie wydawał się skrępowany przez ograniczenia klasycznej

fizyki. W 1916 roku, pracując w Niemczech w szczytowym momencie wojny, Albert Einstein wprowadził do teorii atomowej pojęcie prawdopodobieństwa jako coś tymczasowego, aby dopasować model Bohra do pewnych własności atomów obserwowanych w doświadczeniach. Koncepcja ta przeżyła jednak atom Bohra i stała się fundamentem prawdziwej teorii kwantowej, mimo że, jak na ironię, została później odrzucona przez samego Einsteina w jego sławnym powiedzeniu „Bóg nie gra w kości”.

Rola przypadku. Czy Bóg gra w kości?

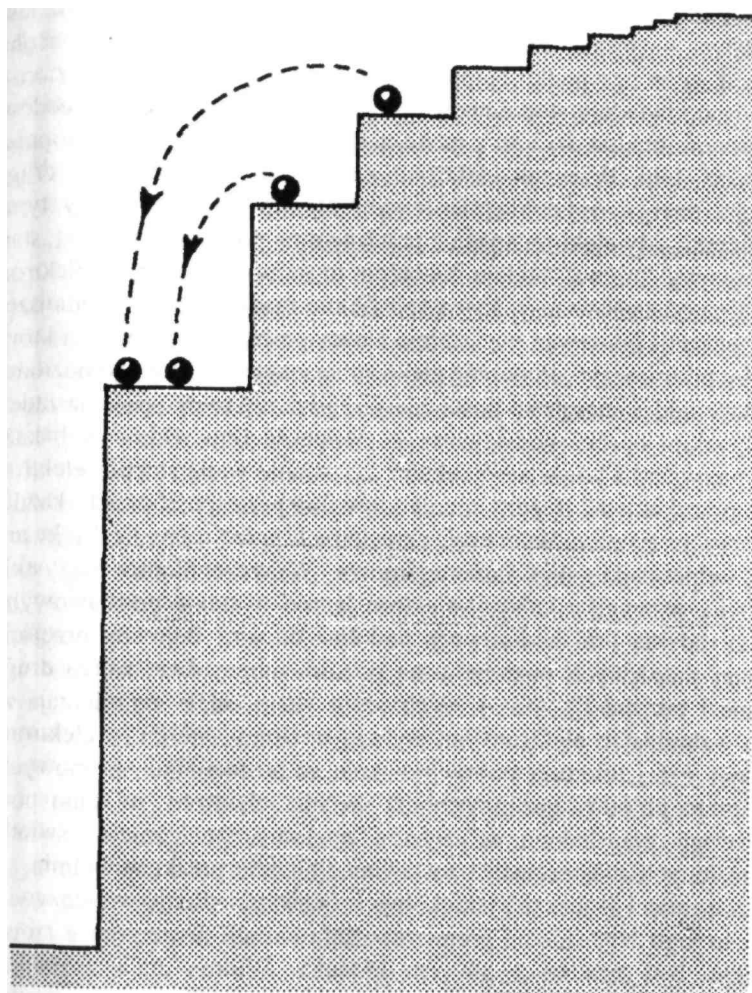
W pierwszych latach naszego stulecia, gdy Rutherford i jego współpracownik, Frederick Soddy, badali naturę promieniotwórczości, odkryli dziwną, a zarazem fundamentalną właściwość atomu, czy raczej jądra atomowego. „Rozpad” radioaktywny, jak przyjęło się mówić, polega na zasadniczej zmianie struktury pojedynczego atomu (obecnie wiemy, że polega na rozpadzie jądra i odrzuceniu jego części), ale w żaden sposób nie zależy od warunków zewnętrznych. Czy się atomy podgrzeje, czy schłodzi, czy umieści w próżni, czy w wiadrze wody, procesu rozpadu w ogóle to nie zaburzy. Aczkolwiek w żaden sposób nie dało się przewidzieć, kiedy pojedynczy atom w radioaktywnej substancji rozpadnie się, emitując cząstkę alfa lub beta i promienie gamma, wszystkie wyniki eksperymentów wskazywały, że spośród dużej liczby atomów tego samego pierwiastka pewna określona część ulegnie rozpadowi w ciągu określonego czasu. W szczególności, dla każdego radioaktywnego pierwiastka jest określony pewien charakterystyczny czas, zwany okresem połowicznego rozpadu²⁰, w ciągu którego dokładnie połowa atomów obecnych w danej próbce ulega rozpadowi. Dla radu czas połowicznego rozpadu wynosi 1600 lat, a dla radioaktywnego węgla ¹⁴C nieco mniej niż 6000 lat, z wielkim pożytkiem dla archeologii; radioaktywny potas rozpada się połowicznie po 1300 milionów lat.

Nie znając mechanizmu, który prowadzi do rozpadu jednego atomu spośród całej próbki, a jego sąsiadów pozostawia w spokoju, Rutherford i Soddy wykorzystali to odkrycie jako podstawę statystycznej teorii rozpadu radioaktywnego, opartej na tej samej metodzie, która stanowi zasadę działania firm ubezpieczeniowych. Aczkolwiek niektórzy klienci tych firm umierają w młodym wieku i ich spadkobiercy otrzymują odszkodowanie znacznie przekraczające sumę wpłaconych składek, firma opiera swój bilans na założeniu, że składki pochodzące od dłużej żyjących klientów pokryją straty; do zbilansowania ksiąg nie jest konieczna informacja, który klient kiedy umrze, wystarczy znajomość tzw. tablic długowieczności opartych na statystyce. Podobne „tablice długowieczności” pozwalają fizykom zbilansować rozpady promieniotwórcze, pod warunkiem, że mają oni do czynienia z dostatecznie dużym zbiorem atomów.

Kolejną dziwną cechą radioaktywności jest fakt, że nigdy nie zanika ona całkowicie. Z wielu milionów atomów początkowo obecnych w próbce połowa rozpada się w pewnym czasie. W ciągu następnego okresu połowicznego rozpadu połowa z tej połowy ulegnie rozpadowi i tak dalej. Liczba atomów pozostałych w próbce wciąż się zmniejsza, jest coraz bliższa zeru, ale w każdym kroku jest tylko o połowę mniejsza.

²⁰ Angielskie określenie jest bardziej optymistyczne - *half-life* oznacza dosłownie „pół życia” (przyp. tłum.).

Rutherford i Soddy, a także inni fizycy w tamtych pionierskich czasach wyobrażali sobie, że w końcu ktoś odkryje dokładną przyczynę rozpadu pojedynczego atomu i że odkrycie to wyjaśni także statystyczną naturę tego procesu. Gdy Einstein wprowadził statystykę do modelu Bohra, aby wyjaśnić pewne szczegóły widm atomów, także spodziewał się, że późniejsze odkrycia wyeliminują potrzebę stosowania statystycznych tablic długowieczności. Wszyscy byli w błędzie.



Ryc 4.1. Poziomy energii w prostym atomie można porównać do schodów o różnej wysokości stopni. Piłka leżąca na określonym stopniu reprezentuje elektron na pewnym Poziomie energii. Przeniesienie piłki na niższy stopień jest równoważne z uwolnieniem ściśle określonej ilości energii wytwarzającej linie widmowe serii Balmera w atomie wodoru.

Nie istnieją pośrednie linie widmowe, ponieważ nie ma pośrednich „stopni”, na których elektron mógłby „spocząć”

Poziomy energii atomu lub raczej elektronu w atomie można sobie wyobrażać jako schody, lecz odległość poszczególnych stopni nie jest jednakowa - górne stopnie są ustawione gęściej niż dolne. Bohr wykazał, że w przypadku najprostszego pierwiastka, wodoru, poziomy energii odpowiadają stopniom, których odległość od szczytu schodów jest proporcjonalna do $1/n^2$, gdzie n jest kolejnym numerem stopnia, licząc od dołu. Przeskok elektronu z poziomu pierwszego na drugi wymaga energii $h\nu$ dokładnie równej różnicy energii między tymi poziomami; gdy elektron spada z powrotem na poziom pierwszy („stan podstawowy” atomu), oddaje dokładnie tę samą ilość energii. Elektron w stanie podstawowym w żaden sposób nie może pochłonąć mniejszej ilości energii, ponieważ nie istnieje żaden pośredni szczebel, na który mógłby przeskoczyć. Podobnie elektron

spadający z drugiego poziomu nie może oddać mniejszej ilości energii, gdyż nie może spaść na żaden inny poziom oprócz podstawowego. Mnogość linii widmowych każdego pierwiastka wiąże się z faktem, że istnieje wiele stopni i elektron może przeskakiwać między niemal dowolną parą spośród nich; każdej parze stopni (poziomów energii określonych przez różne liczby kwantowe) odpowiada jakaś linia widmowa. W szczególności wszystkie przejścia, w wyniku których elektron ląduje w stanie podstawowym, tworzą rodzinę linii widmowych podobną do serii Balmera; przejścia z wyżej położonych poziomów na poziom numer dwa tworzą drugą rodzinę i tak dalej²¹. Atomy w gorącej gazie ciągle się zderzają ze sobą, wzbudzając elektrony na wyższe poziomy energii, a elektrony spadając niżej, emitują promieniowanie w postaci linii widmowych. Gdy przez chłodny gaz przechodzi światło, elektrony ze stanu podstawowego przeskakują na wyższe poziomy, pochłaniając światło o określonych częstościach i zostawiając ciemne prążki w widmie.

Jeżeli model Bohra ma jakiegokolwiek odzwierciedlenie w rzeczywistości, to jego wyjaśnienie promieniowania energii przez gorące atomy powinno być zgodne z prawem Plancka. Widmo ciała doskonale czarnego powinno być po prostu łącznym efektem promieniowania energii przez elektrony przeskakujące z jednego poziomu na drugi.

Einstein ukończył swoją ogólną teorię względności w 1916 roku i zainteresował się ponownie teorią kwantową (w porównaniu do teorii względności zajęcie to wydawało się odpoczynkiem po pracy).

Prawdopodobnie zachęcił go sukces modelu Bohra, a ponadto jego własna wersja korpuskularnej teorii światła zaczęła w końcu zdobywać uznanie. Amerykański fizyk, Robert Andrews Millikan, należał do najbardziej zagorzałych przeciwników podanej przez Einsteina interpretacji efektu fotoelektrycznego, gdy została ogłoszona w 1905 roku. Millikan spędził dziesięć lat, badając ten efekt w serii wspaniałych eksperymentów. Zamierzał wykazać, że interpretacja Einsteina oparta na kwantach światła, czyli fotonach, jest błędna. Ostatecznie w 1914 roku doszedł do bezpośredniego eksperymentalnego potwierdzenia słuszności teorii Einsteina. W rezultacie opracował bardzo dokładną technikę pomiaru stałej Plancka h , a w 1923 roku otrzymał Nagrodę Nobla (aby ironia była pełna - za pomiar wartości h oraz ładunku elektronu).

Einstein zdał sobie sprawę, że „rozpad” atomu od stanu o wyższej energii, z elektronem na wyższym poziomie, do stanu o niższej energii, z elektronem na niższym poziomie jest bardzo podobny do radioaktywnego rozpadu atomu; zastosował techniki statystyczne opracowane przez Boltzmann (przewidziane raczej do obliczeń zachowania dużych zespołów atomów) do pojedynczych stanów atomowych. Wprowadził pojęcie prawdopodobieństwa zdarzenia polegającego na tym, że pojedynczy atom znajdzie się w stanie odpowiadającym liczbie kwantowej n , a następnie, przez analogię do probabilistycznych tablic rozpadów promieniotwórczych, opracował probabilistyczną teorię przejść atomowych pomiędzy różnymi stanami energii, opisanymi różnymi liczbami kwantowymi. W rezultacie otrzymał wzór Plancka, w prosty i jasny sposób wyprowadzony z kwantowych przesłanek. Niewiele później Bohr, posługując się

²¹ Ściśle biorąc, seria Balmera w wodorze odpowiada przejściom na poziom numer dwa. [Przejściom na poziom numer jeden odpowiada seria Lymana - przyp. tłum.]

statystyczną metodą Einsteina, rozszerzył swój model, tłumacząc różne natężenia linii widmowych różnicami prawdopodobieństw przejść między poszczególnymi stanami atomu. Nie umiał wytłumaczyć, skąd się te różnice biorą, ale w owym czasie nikogo to specjalnie nie interesowało.

Podobnie jak inni uczeni, którzy w tym czasie badali radioaktywność, Einstein zakładał, że tablice prawdopodobieństw są tylko półśrodkiem, oraz że dalsze badania wykażą, dlaczego w konkretnym atomie przejście nastąpiło w tym, a nie innym momencie. Jednak teoria kwantowa właśnie w tym punkcie zerwała z ideami klasycznej fizyki. Żaden ukryty powód rozpadu promieniotwórczego albo przejścia elektronowego nie został nigdy znaleziony. Wydaje się, że zdarzenia te zachodzą całkowicie przypadkowo, co oczywiście stwarza duże problemy filozoficzne.

W świecie fizyki klasycznej wszystko ma swoją przyczynę. Można prześledzić przyczynę każdego zdarzenia wstecz w czasie, następnie znaleźć przyczynę przyczyny i tą drogą dojść do wielkiego wybuchu (jeśli się jest kosmologiem) albo - w kontekście religijnym - do momentu stworzenia świata (wybór modelu zależy od indywidualnych preferencji). Wszakże w świecie kwantów ta bezpośrednia przyczynowość znika, gdy spojrzy się na zjawiska radioaktywne lub przejścia atomowe. Elektron nie przenosi się z jednego poziomu na drugi w danym momencie z jakiegoś określonego powodu. Niższy poziom energii jest bardziej dla atomu pożądany w sensie statystycznym, jest więc całkiem prawdopodobne (stopień tego prawdopodobieństwa można nawet określić liczbowo), że elektron prędzej lub później wykona ten ruch. Ale nie można powiedzieć, kiedy dokładnie się to zdarzy. Żadna zewnętrzna siła nie popycha elektronu ani żaden wewnętrzny zegar nie oblicza czasu przeskoku, który zachodzi sam z siebie, bez szczególnego powodu, akurat w danej chwili.

Ścisłe rzecz ujmując, nie jest to jeszcze zerwanie z przyczynowością. Chociaż wielu dziewiętnastowiecznych uczonych byłoby przerażonych tego rodzaju pomysłami, wątpię, czy kogokolwiek z czytelników tej książki bardzo to niepokoi. Jednak to zaledwie szczyt góry lodowej, pierwsza istotna oznaka prawdziwej niezwykłości kwantowego świata, której znaczenie nie zostało zauważone w momencie, gdy za sprawą Einsteina pojawiła się w 1916 roku.

Atomy w perspektywie

Wyjaśnianie wszystkich szczegółowych udoskonaleń modelu atomu Bohra byłoby samo w sobie dostatecznie nudne, a dodatkowo na końcu się okaże, że w przeważającej części to udoskonalanie po omacku było bezowocne. Jednak atom Bohra tak mocno zadomowił się w podręcznikach i tekstach popularyzatorskich, że nie można go pominąć, zwłaszcza że w swojej ostatecznej formie jest bodajże ostatnim modelem atomu, który w jakimś stopniu odwołuje się do naszego codziennego doświadczenia. Niepodzielny atom Demokryta okazał się nie tylko podzielny, ale i w większości złożony z pustej przestrzeni, w której dziwne małe cząstki dziwnie się zachowują. Bohr stworzył model, w ramach którego niektóre z tych dziwnych rzeczy można umieścić w kontekście niezupełnie oderwanym od codziennej rzeczywistości.

Z pewnych względów byłoby lepiej pozbyć się tego kontekstu przed pogrążeniem się w świat kwantów, ale większość ludzi woli najpierw oswoić się z głębością, studiując atom Bohra. Nie

będziemy tracić czasu i energii na śledzenie wszystkich pomyłek i półprawd, które pojawiły się w trakcie powstawania tego „łatanego” modelu w okresie poprzedzającym rok 1926, lecz wykorzystamy naszą obecną wiedzę i spojrzymy na atom Bohra z perspektywy lat osiemdziesiątych, dzięki czemu uzyskamy nowoczesną syntezę idei Bohra i jego kolegów, łącznie z niektórymi elementami układanki, o które została uzupełniona znacznie później.

Atomy są bardzo małe. Liczba Avogadra określa, ile jest atomów wodoru w jednym gramie tego gazu. Ponieważ jednak na co dzień nie mamy z wodorem do czynienia, zatem dla lepszego zilustrowania rozmiarów atomu wykorzystajmy raczej węgiel - w postaci zwykłego węgla, diamentu albo sadzy. Każdy atom węgla jest dwanaście razy cięższy od atomu wodoru, więc taka sama liczba atomów węgla waży dwanaście gramów, co mniej więcej odpowiada łyżce cukru, sporemu diamentowi albo dosyć małemu kawałkowi węgla. W tym małym kawałku jest 6×10^{23} (6 z 23 zerami) atomów węgla - liczba Avogadra. Jak wyobrazić sobie taką liczbę? Dla bardzo dużych liczb używamy często określenia „astronomiczne”, gdyż niektóre liczby w astronomii są rzeczywiście duże, więc spróbujmy znaleźć porównywalnie dużą liczbę w astronomii.

Wedle naszej obecnej wiedzy wiek wszechświata wynosi około 15 miliardów lat (15×10^9 lat). Widać, że 10^{23} jest dużo większą liczbą niż 10^9 , więc użyjmy do określenia wieku wszechświata najmniejszej jednostki czasu, do której jesteśmy przyzwyczajeni, mianowicie sekundy. Rok składa się z 365 dni, dzień z 24 godzin, a godzina z 3600 sekund, czyli rok zawiera około 32 milionów sekund, co w przybliżeniu daje liczbę 3×10^7 . Zatem 15 miliardów lat zawiera 45×10^{16} sekund (liczby w postaci wykładniczej mnożymy, dodając wykładniki, czyli mnożąc 10^9 przez 10^7 , dostajemy 10^{16}), więc wiek wszechświata w sekundach wynosi około 5×10^{17} .

Do 6×10^{23} jeszcze sporo nam brakuje - sześć rzędów wielkości. Nie jest już jednak tak źle jak poprzednio, więc spróbujmy zobaczyć, co to znaczy. Dzieląc 6×10^{23} przez 5×10^{17} (tym razem odejmujemy wykładniki), otrzymamy trochę więcej niż 1×10^6 , czyli jeden milion. Wyobraźmy sobie nadprzyrodzoną istotę obserwującą ewolucję wszechświata od jego powstania w wielkim wybuchu. Istota owa jest zaopatrzona w bryłkę czystego węgla - dwanaście gramów – oraz parę szczypteczek tak dokładnych, że może nimi uchwycić pojedynczy atom węgla. Zaczynając od momentu powstania wszechświata, istota owa co sekundę usuwa jeden atom węgla z bryłki. Do chwili obecnej wyrzuciła już 5×10^{17} atomów, ile jeszcze pozostało? Pracując wytrwale przez 15 miliardów lat, istota usunęła zaledwie jedną milionową część bryłki. To co pozostało, jest wciąż milion razy większe od odrzuconej części!

Mam nadzieję, że powyższy przykład pomaga zdać sobie sprawę z rozmiarów atomu. Niespodzianka nie polega na tym, że model Bohra jest wielkim przybliżeniem ani na tym, że reguły codziennej fizyki nie stosują się do atomów. Zakrawa niemal na cud, że wiemy c o k o l w i e k o atomach i że potrafimy znaleźć pomost pomiędzy klasyczną fizyką Newtona a kwantową fizyką atomu.

Na tyle, na ile można w ogóle stworzyć fizyczny obraz czegoś tak niewyobrażalnie małego, atom wygląda następująco. Jak pokazał Rutherford, małe centralne jądro jest otoczone przez

chmurę elektronów, krążących jak osy wokół gniazda. Początkowo sądzono, że jądro składa się wyłącznie z protonów, których dodatni ładunek jest dokładnie równy ujemnemu ładunkowi elektronu, co sprawia, że posiadający jednakową liczbę protonów i elektronów atom jest elektrycznie neutralny. Później okazało się, że istnieje jeszcze jedna fundamentalna cząstka atomowa, bardzo podobna do protonu, ale pozbawiona ładunku - neutron, który występuje w jądrach atomów wszystkich pierwiastków, oprócz najprostszej formy wodoru. W neutralnym atomie liczba protonów i elektronów rzeczywiście jest taka sama. Liczba protonów decyduje o tym, z którym pierwiastkiem mamy do czynienia, liczba elektronów (taka sama jak liczba protonów) decyduje o chemicznych właściwościach atomu (a zatem i danego pierwiastka). Ponieważ jednak atomy niektórych pierwiastków (mające tę samą liczbę protonów i elektronów) mogą różnić się liczbą neutronów w jądrze, pierwiastki te występują w różnych wersjach, zwanych izotopami. Nazwę tę wymyślił w 1913 roku Soddy. Pochodzi ona od greckiego określenia oznaczającego „to samo miejsce”, gdyż izotopy jednego pierwiastka, mimo iż różnią się wagą, znajdują się w tym samym miejscu w tablicy okresowej pierwiastków. W 1921 roku Soddy otrzymał Nagrodę Nobla (z chemii) za swoje prace o izotopach.

Najprostszy izotop najprostszego pierwiastka, czyli pospolity wodór, składa się z jednego protonu, któremu towarzyszy jeden elektron. Atom deuteru składa się z jednego protonu i jednego neutronu, którym towarzyszy jeden elektron, ale właściwości chemiczne deuteru są takie same jak zwykłego wodoru. Masy protonu i neutronu są niemal jednakowe, a każdy z nich jest około 2000 razy cięższy od elektronu, więc łączna liczba protonów i neutronów w jądrze określa całkowitą masę atomu, zwaną liczbą masową i oznaczaną literą A . Liczba protonów w jądrze, określająca właściwości chemiczne danego pierwiastka, jest nazywana liczbą atomową i oznaczana literą Z . Jednostka, w której mierzy się masy atomowe (zwana dosyć logicznie jednostką masy atomowej), jest zdefiniowana jako jedna dwunasta masy izotopu węgla, którego jądro składa się z sześciu neutronów i sześciu protonów. Izotop ten zwany jest węglem-12 albo krótko ^{12}C ; inne izotopy węgla to ^{13}C - z siedmioma neutronami w jądrze, oraz ^{14}C - z ośmioma. Im cięższe jądro (im więcej zawiera protonów), tym więcej może mieć izotopów. Na przykład cyna ma pięćdziesiąt protonów w jądrze ($Z = 50$) i dziesięć stabilnych izotopów, których liczby masowe zawierają się w przedziale od $A = 112$ (62 neutrony) do $A = 124$ (74 neutrony). W stabilnych jądrach jest zawsze co najmniej tyle samo neutronów co protonów (z wyjątkiem wodoru); neutralne neutrony pomagają utrzymać w jądrze dodatnio naładowane protony, które mają tendencję do odpychania się nawzajem. Promieniotwórczość jest związana z niestabilnymi izotopami, które zmieniają się w stabilną formę poprzez emisję promieniowania. Neutron zamieniający się w proton emituje promieniowanie beta, czyli elektron. Cząstka alfa jest sama w sobie jądrem atomowym - składa się z dwóch protonów i dwóch neutronów - i stanowi jądro helu-4. Powstaje w wyniku zmiany wewnętrznej struktury niestabilnego jądra cięższego pierwiastka. Bardzo ciężkie niestabilne jądra dzielą się na dwa lub więcej lżejszych jąder w procesie zwanym obecnie rozszczepieniem jądrowym, przy okazji którego powstają też cząstki alfa i beta. Wszystko to odbywa się w objętości, która jest niewyobrażalnie

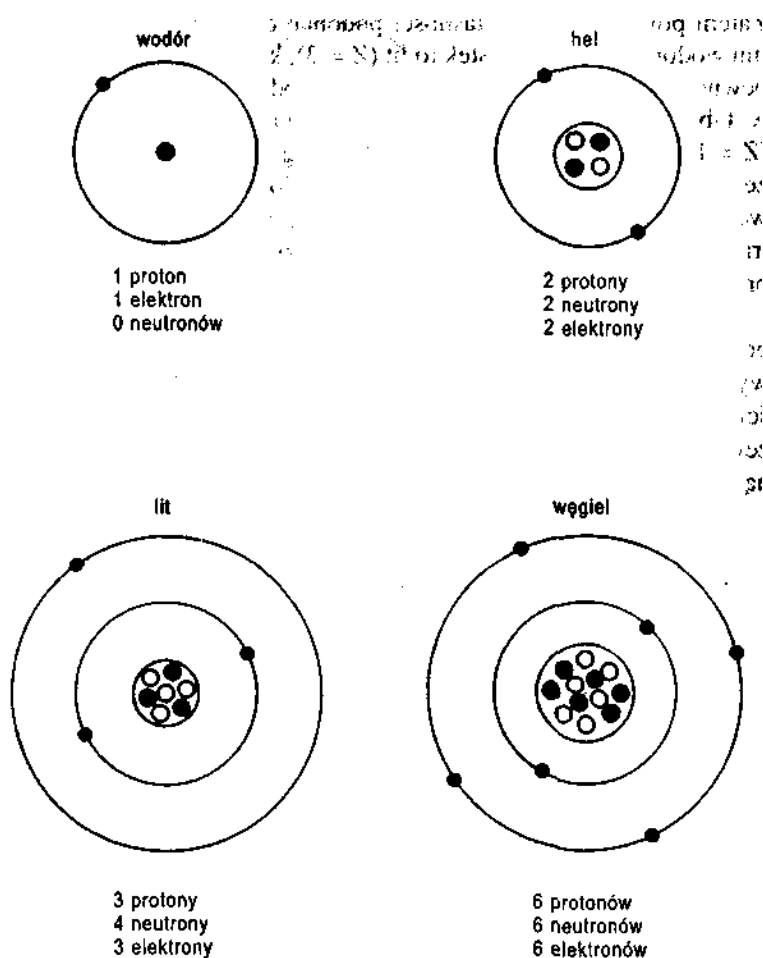
mniejsza od niemal niewyobrażalnie małej objętości samego atomu. Typowy atom ma promień rzędu 10^{-10} metra, a typowe jądro około 10^{-15} , czyli 10^5 razy mniej. Ponieważ objętość jest proporcjonalna do trzeciej potęgi promienia, musimy pomnożyć wykładnik przez trzy. Okazuje się, że objętość jądra jest 10^{15} razy mniejsza od objętości całego atomu.

Chemia wyjaśniona

Chmura elektronów to zewnętrzna wizytówka atomu - przez nią atom oddziałuje z innymi atomami. To, co ukryte głęboko wewnątrz, jest w zasadzie nieistotne - inne atomy „widzą” i „czują” wyłącznie elektrony. Chemia polega na oddziaływaniach między elektronami. Wyjaśniając ogólne własności chmury elektronowej, model Bohra uczynił z chemii naukę ścisłą. Chemicy już wcześniej wiedzieli, że niektóre pierwiastki mają bardzo podobne własności chemiczne, mimo różnicy mas. Gdy ustawi się pierwiastki w tabeli według ich mas (szczególnie, gdy zaniedba się różne izotopy), te podobne pierwiastki pojawiają się w regularnych odstępach, na przykład co osiem pierwiastków własności się powtarzają. Stąd „okresowa” tablica pierwiastków.

W czerwcu 1922 roku Bohr odwiedził uniwersytet w Getyndze i wygłosił serię wykładów o teorii kwantowej oraz o strukturze atomowej. Getynga właśnie stawała się jednym z trzech ośrodków kluczowych dla rozwoju mechaniki kwantowej, pod kierunkiem Maxa Borna, który został w 1921 roku profesorem fizyki teoretycznej. Urodzony w 1882 roku, syn profesora anatomii na uniwersytecie we Wrocławiu, Bom był studentem w pierwszych latach dwudziestego wieku. Początkowo studiował matematykę, a dopiero po zrobieniu doktoratu w 1906 roku zajął się fizyką (przez pewien czas był w Cavendish Laboratory). Jak się przekonamy, ten rodzaj przygotowania okazał się później idealny. Prace Borna (eksperta od teorii względności) były zawsze rygorystycznie dopracowane pod względem matematycznym, co kontrastowało z teoretycznymi wywodami Bohra, opartymi wprawdzie na błyskotliwej intuicji fizycznej, ale często bez matematycznych szczegółów. Oba rodzaje geniuszu okazały się nieodzowne dla nowej teorii atomu.

Na wykłady Bohra zjechali naukowcy ze wszystkich stron Niemiec - były one ważnym etapem w odrodzeniu się niemieckiej fizyki po wojnie, a także w historii teorii kwantowej, i szybko stały się sławne jako „festiwal Bohra” (co jest niezbyt subtelną aluzją do pewnych innych niemieckich uroczystości). Bohr po szczegółowym wstępie przedstawił pierwszą udaną teorię układu okresowego pierwiastków, która w prawie nie zmienionej formie przetrwała do dziś. Teoria Bohra opiera się na koncepcji dodawania kolejnych elektronów do atomu. Niezależnie od liczby atomowej pierwszy elektron trafia na poziom energii odpowiadający stanowi podstawowemu wodoru. Następny elektron osiąga podobny poziom, co daje atom helu o dwóch elektronach. Jednak, zdaniem Bohra, na trzeci elektron nie ma miejsca na tym poziomie i musi on trafić na inny poziom. Atom z trzema protonami w jądrze i trzema elektronami wokół jądra powinien mieć dwa spośród trzech elektronów bardziej związane z jądrem, a trzeci nieco mniej.



Ryc. 4.2. Atomy większości pierwiastków można w uproszczeniu przedstawić jako jądro otoczone elektronami poukładanymi na powłokach. Kolejnym powłokom odpowiadają stopnie - poziomy energii. Reguły kwantowe dopuszczają tylko dwa elektrony na najniższej powłoce, więc lit musi umieścić swój trzeci elektron na drugiej powłoce. Jest na niej „miejsce” na osiem elektronów, zatem w atomie węgla jest ona wypełniona dokładnie w połowie. Dzięki temu węgiel ma interesujące własności i jest „podstawowym pierwiastkiem” życia.

Zatem powinien mieć własności podobne do jednoelektronowego atomu wodoru. Ten pierwiastek to lit ($Z = 3$), który rzeczywiście wykazuje pewne chemiczne podobieństwo do wodoru. Następny pierwiastek w tablicy okresowej o własnościach podobnych do wodoru to sód ($Z = 11$),

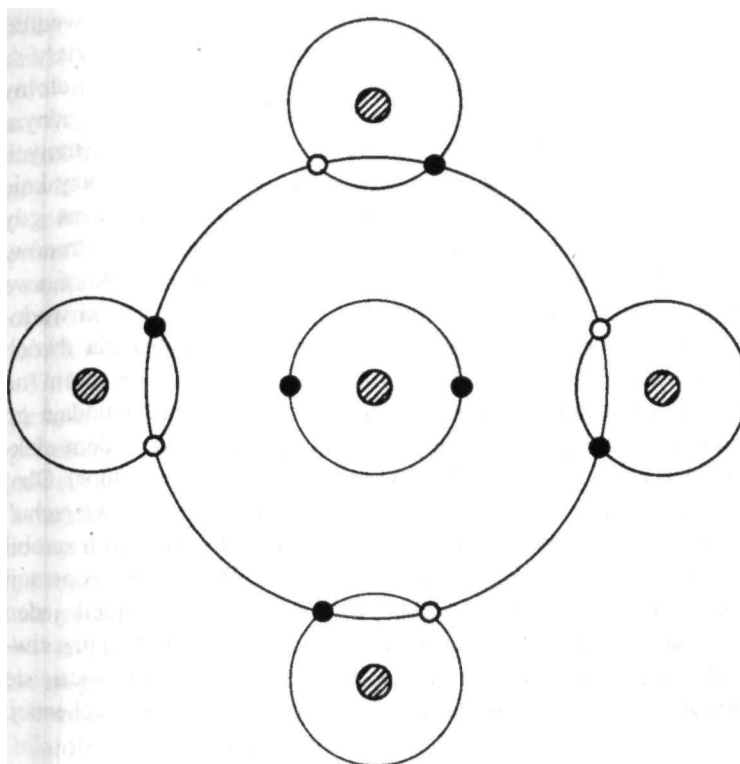
znajdujący się osiem miejsc dalej niż lit. Bohr wywnioskował, że musi być osiem wolnych miejsc na poziomie energii powyżej dwóch wewnętrznych elektronów. Po ich wypełnieniu jedenasty elektron musi trafić na kolejny poziom, jeszcze słabiej związany z jądrem, co znowu prowadzi do powstania układu naśladującego atom jednoelektronowy.

Te kolejne stany energetyczne noszą nazwę powłok. Pomysł Bohra polega na sukcesywnym wypełnianiu powłok w miarę wzrostu Z. Jeśli wyobrazimy sobie powłoki jako kolejne warstwy cebuli, to dla własności chemicznych pierwiastka istotna jest liczba elektronów w ostatniej zewnętrznej warstwie. To, co znajduje się głębiej, odgrywa drugorzędną rolę w oddziaływaniach z innymi atomami.

Posuwając się „na zewnątrz” powłok elektronowych i uwzględniając wszystkie dostępne dane ze spektroskopii, Bohr wyjaśnił związki między pierwiastkami w kategoriach struktury atomowej. Mimo że nie umiał wytłumaczyć, dlaczego powłoka zawierająca osiem elektronów powinna być pełna („zamknięta”), nikt z jego słuchaczy nie miał wątpliwości, że Bohr odkrył ogólną zasadę. Heisenberg wspominał później, że Bohr „nic nie udowodnił matematycznie [...] on po prostu wiedział, że mniej więcej taka jest zależność”²². Einstein, opisując sukces opartej na teorii kwantów pracy Bohra, tak to skomentował w swoich *Zapiskach autobiograficznych* w 1949 roku: „Uważałem i do dziś uważam za cud, że ten pełen sprzeczności i niepewny fundament okazał się dla człowieka o tak wyjątkowym instynkcie i subtelności jak Bohr wystarczający do odkrycia podstawowych praw linii spektralnych i powłok atomowych, a zarazem ich znaczenia dla chemii”²³.

Chemia opisuje, w jaki sposób atomy oddziałują i łączą się ze sobą, tworząc cząsteczki (molekuły). Dlaczego węgiel oddziałuje z wodorem w taki sposób, że cztery atomy wodoru łączą się z jednym atomem węgla, tworząc cząsteczkę metanu? Dlaczego wodór występuje w postaci cząsteczkowej, z dwoma atomami w cząsteczce, podczas gdy hel nie tworzy cząsteczek? I tak dalej. Odpowiedzi udziela model powłokowy, i to w zadziwiająco prosty sposób. Atom wodoru ma jeden elektron, natomiast hel - dwa. „Najgłębsza” powłoka wypełni się, gdy znajdą się na niej dwa elektrony, a pełna powłoka jest (z nieznanego powodu) stabilniejsza - atomy „lubią” mieć wypełnione powłoki. Gdy dwa atomy wodoru spotkają się, tworząc cząsteczkę, dzielą się swoimi dwoma elektronami w taki sposób, że każdy atom odczuwa korzyści z posiadania wypełnionej powłoki. Hel, który sam z siebie ma wypełnioną powłokę, nie jest zainteresowany tego rodzaju układem i odrzuca wszelkie propozycje reakcji chemicznych.

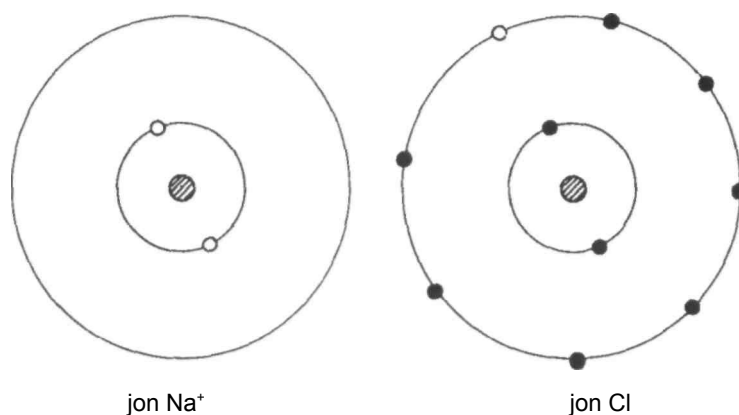
²² J. Mehra, H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory*, t. 1, s. 357. Tamże, s. 359.



Ryc. 4.3. Gdy atom węgla łączy się z czterema atomami wodoru, elektrony zostają podzielone w taki sposób, że każdy atom wodoru „widzi” dwa elektrony (zapełniona wewnętrzna powłoka), a atom węgla „widzi” osiem elektronów (zapełniona druga powłoka). Taka konfiguracja jest bardzo stabilna

Węgiel ma sześć protonów w jądrze i sześć elektronów na zewnątrz. Dwa z nich znajdują się na wewnętrznej powłoce, a pozostałe cztery są związane z następną powłoką, która jest w połowie pusta. Cztery atomy wodoru mogą zawrzeć układ z węglem, każdy dając do puli po jednym elektronie, w zamian za częściowy udział w czterech zewnętrznych elektronach atomu węgla. W rezultacie każdy atom wodoru uzyskuje pseudozamkniętą dwuelektronową wewnętrzną powłokę, podczas gdy atom węgla pseudozamkniętą drugą powłokę złożoną z ośmiu elektronów.

Zdaniem Bohra atomy łączą się w taki sposób, aby zamknąć swą zewnętrzną powłokę. Czasami, na przykład w wypadku cząsteczki wodoru, najlepiej jest wyobrazić sobie parę elektronów wspólną dla dwóch jąder. W innych sytuacjach lepiej wyobrazić sobie, że jakiś atom (na przykład sodu) ma jeden elektron na zewnętrznej powłoce i oddaje go innemu atomowi, który na swojej zewnętrznej powłoce ma siedem elektronów i jedno puste miejsce (w tym wypadku mógłby to być chlor). Obaj są szczęśliwi - atom sodu oddał zewnętrzny elektron i „na wierzchu” została mu wewnętrzna zapełniona powłoka, natomiast atom chloru zarobił jeden elektron i zapełnił swoją zewnętrzną powłokę. W efekcie tej operacji atom sodu został naładowany elektrycznie dodatnio (bo stracił jeden ujemnie naładowany elektron), a atom chloru ujemnie. Ładunki o przeciwnych znakach przyciągają się, więc w rezultacie oba atomy łączą się w elektrycznie obojętną cząsteczkę chlorku sodu, czyli soli kuchennej.



Ryc. 4.4. Oddając swój jedyny zewnętrzny elektron, atom sodu osiąga pożądaną konfigurację (zamkniętą powłokę) oraz dodatni ładunek elektryczny. Przyjmując dodatkowy elektron, atom chloru uzupełnia swoją zewnętrzną powłokę do ośmiu elektronów i przy okazji uzyskuje ujemny ładunek elektryczny. Powstałe w ten sposób jony sodu i chloru tworzą - dzięki siłom elektrycznym - cząsteczki i kryształy soli kuchennej (NaCl)

Wszystkie reakcje chemiczne można w wytłumaczyć jako transakcję dzielenia się albo wymiany elektronów pomiędzy atomami, która ma na celu uzyskanie stabilności polegającej na zamknięciu powłok elektronowych. Zmiany energii i promieniowanie związane z zewnętrznymi elektronami wytwarzają widma charakterystyczne dla danego pierwiastka, ale gdy są zaangażowane głębiej leżące powłoki (i tym samym większe energie, w zakresie promieni X), widma powinny być takie same dla wszystkich pierwiastków. I rzeczywiście tak jest. Jak wszystkie dobre teorie model Bohra został zweryfikowany z pozytywnym wynikiem. W 1922 roku w tablicy okresowej pierwiastków wciąż jeszcze było kilka pustych miejsc, odpowiadających nie odkrytym pierwiastkom o liczbach atomowych: 43, 61, 72, 75, 85 i 87. Model Bohra przewidywał szczegółowo własności tych „brakujących” pierwiastków; w szczególności zaś pierwiastek 72 powinien mieć własności podobne do cyrkonu. Przepowiednia ta, sprzeczna z przewidywaniami innych modeli atomu, uzyskała potwierdzenie w ciągu roku w wyniku odkrycia hafnu, którego własności okazały się dokładnie takie, jak zapowiedział Bohr. Było to szczytowe osiągnięcie starej teorii kwantów. Trzy lata później została ona zastąpiona inną teorią, aczkolwiek z punktu widzenia chemii potrzeba niewiele więcej niż koncepcja elektronów orbitujących wokół jądra w powłokach, które „lubią” być zapełnione (albo puste)²³. Podobnie, jeżeli interesuje nas fizyka gazów, wystarczy niewiele więcej niż obraz atomów jako twardych, niezniszczalnych kul bilardowych. Dziewiętnastowieczna fizyka daje sobie radę z większością codziennych problemów, fizyka 1923 roku - z większością problemów chemii, a fizyka lat trzydziestych prowadzi nas niemal na krańce obszarów zbadanych w poszukiwaniu ostatecznych praw przyrody. Od pięćdziesięciu lat nie było przełomu porównywalnego z rewolucją

²³ Trochę oczywiście przesadzam z tą prostotą chemii. To „niewiele więcej”, które potrzeba do zrozumienia bardziej złożonych cząsteczek powstało w późnych latach dwudziestych i we wczesnych trzydziestych, na podstawie pełnej wersji mechaniki kwantowej. Człowiekiem, który tego dokonał, był Linus Pauling, bardziej dzisiaj znany jako orędownik pokoju i propagator witaminy C. Pierwszą ze swoich dwu Nagród Nobla otrzymał za pracę określoną w 1954 roku jako „badania natury wiązania chemicznego i ich zastosowania do wyjaśnienia struktury substancji złożonych”. Te „substancje złożone”, wyjaśnione w ramach teorii kwantowej przez fizykochemika Paulinga, otworzyły drogę do badania molekuł życia. Kluczowe znaczenie chemii kwantowej dla biologii molekularnej przyznał Horace Judson w swej książce *The Eighth Day of Creation*. Szczegóły wykraczają jednak poza zakres niniejszej pracy.

kwantową, i w ciągu tego czasu reszta naukowców próbowała nadążyć za osiągnięciami grupki geniuszy. Sukces paryskich eksperymentów Aspecta we wczesnych latach osiemdziesiątych oznaczał koniec tego okresu, po raz pierwszy przyniósł bezpośredni doświadczalny dowód, że nawet najdziwniejsze aspekty mechaniki kwantowej stanowią dosłowny opis realnego świata. Nadszedł czas, abyśmy się przekonali, że świat kwantów istotnie jest bardzo dziwny.

CZĘŚĆ DRUGA

MECHANIKA KWANTOWA

Cała nauka to fizyka, reszta to filatelistyka.

ERNEST RUTHERFORD

1871-1937

Rozdział piąty

Fotony i elektrony

Pomimo sukcesu Plancka i Bohra, jakim było wskazanie drogi w kierunku fizyki bardzo małych obiektów, różnej od klasycznej mechaniki, znana nam dzisiaj teoria kwantowa zaistniała naprawdę dopiero wraz z przyjęciem koncepcji kwantu światła Einsteina oraz uznaniem faktu, że światło musi być opisywane równocześnie w kategoriach fal i cząstek. Mimo że Einstein wprowadził pojęcie kwantu światła w swojej publikacji o efekcie fotoelektrycznym w 1905 roku, dopiero około 1923 roku pomysł ten zyskał powszechną aprobatę. Sam Einstein był ostrożny, mając świadomość rewolucyjnych konsekwencji swojej pracy, i w 1911 roku oznajmił uczestnikom pierwszego Kongresu SoWaya: „Nalegam na prowizoryczny charakter tej koncepcji, gdyż nie wydaje się ona do pogodzenia z doświadczalnie zweryfikowanymi konsekwencjami teorii falowej”²⁴.

Aczkolwiek Millikan wykazał w 1915 roku, że odkryte przez Einsteina równanie dla efektu fotoelektrycznego jest słuszne, zaakceptowanie światła w postaci cząstek wciąż wydawało się nierozsądne. Już z perspektywy lat czterdziestych Millikan tak skomentował swoją pracę: „Byłem zmuszony w 1915 roku uznać niewątpliwą słuszność tego równania pomimo jego absurdalności [...] wydawało się ono przeczyć wszystkiemu, co wiedzieliśmy o interferencji światła”. W swoim czasie wyraził ten pogląd w znacznie mocniejszych słowach - w sprawozdaniu z przeprowadzonego w 1915 roku doświadczalnego weryfikowania równania Einsteina dla efektu fotoelektrycznego, Millikan stwierdził: „Semicząstkowa teoria, za pomocą której Einstein wyprowadził to równanie, wydaje się obecnie całkowicie nie do utrzymania”. W 1918 roku Rutherford dodał, że nie ma „fizycznego wyjaśnienia” związku między energią a częstością, który Einstein wyjaśnił trzynaście lat wcześniej przy wykorzystaniu swojej hipotezy kwantów światła. To nie znaczy, że Rutherford nie znał sugestii Einsteina, lecz że nie był do niej przekonany. Wszystkie doświadczenia mające na celu weryfikację falowej teorii światła pokazywały, że światło jest falą, więc jakim sposobem mogłoby być cząstką?²⁵

²⁴ Kongresy SoWaya były to konferencje naukowe, sponsorowane przez Ernesta SoWaya, belgijskiego chemika, który dorobił się fortuny na wynalezionej przez siebie metodzie produkcji węgla sodu. Interesując się bardziej abstrakcyjną nauką, SoWay zapewnił fundusze na organizowanie kongresów, w ramach których czołowi fizycy owych czasów mogli się spotykać i wymieniać poglądy.

²⁵ Cytaty w tym ustępie pochodzą z pracy A. Paisa *Subtle is the Lord...*

Cząstki światła

W 1909 roku, mniej więcej wtedy, gdy przestał być urzędnikiem patentowym i objął swoją pierwszą akademicką posadę jako asystent profesora w Zurychu, Einstein uczynił niewielki, ale istotny krok do przodu, po raz pierwszy mówiąc o „punktowym kwancie o energii $h\nu$ ” Cząstki takie jak elektron są w mechanice klasycznej opisywane przez punktowe obiekty, co daleko odbiega od jakiegokolwiek opisu w kategoriach falowych, z wyjątkiem tego, że częstość ν określa energię cząstki. „Moim zdaniem - stwierdził w 1909 roku Einstein - następny etap rozwoju fizyki teoretycznej przyniesie nam teorię światła, która będzie mogła być interpretowana jako pewnego rodzaju połączenie teorii falowej i emisyjnej”.

Uwaga ta, w swoim czasie niemal nie zauważona, trafia w samo sedno nowoczesnej teorii kwantowej. W latach dwudziestych Bohr wyraził tę nową podstawę fizyki jako „zasadę komplementarności”, która głosi, że teorie falowa i cząstkowa wzajemnie się nie wykluczają, lecz uzupełniają. Do pełnego opisu konieczne są obie koncepcje, co znajduje potwierdzenie w potrzebie określania energii „cząstki” światła poprzez jej częstość albo długość fali.

Jednakże wkrótce po tym Einstein zarzucił swoje studia nad teorią kwantową, gdyż pracował wówczas nad ogólną teorią względności. Gdy w 1916 roku wrócił do kwantów, dokonał następnego logicznego kroku w rozwoju teorii kwantowej - jego statystyczne koncepcje pomogły uporządkować obraz atomu Bohra i poprawiły opis promieniowania ciała doskonale czarnego stworzony przez Plancka. Obliczenia związane z efektami absorpcji i emisji promieniowania przez ciała materialne wyjaśniły także, w jaki sposób promieniowanie przekazuje materii pęd, przy założeniu, że każdy kwant promieniowania $h\nu$ niesie ze sobą pęd $h\nu/c$. Prace te odwoływały się częściowo do jednej z trzech wybitnych publikacji Einsteina z 1905 roku, mianowicie dotyczącej ruchów Browna. Podobnie jak chaotyczny ruch pyłków kwiatów potrącanych przez atomy gazu lub cieczy dowodzi realności atomów, atomy są także potrącane przez „cząstki” promieniowania. Te „ruchy Browna” atomów i cząsteczek nie są bezpośrednio obserwowalne, ale wywołane przez nie efekty statystyczne można interpretować i mierzyć w kategoriach niektórych własności gazu, na przykład ciśnienia. Te właśnie statystyczne efekty Einstein wytłumaczył, wykorzystując obdarzone pędem cząstki promieniowania.

Wzór na pęd „cząstki” promieniowania wywodzi się w bardzo prosty sposób ze szczególnej teorii względności, w której energia E , pęd p i masa spoczynkowa cząstki m są związane prostą zależnością

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2.$$

Masa spoczynkowa cząstki promieniowania jest równa zero, więc powyższe równanie redukuje się do

$$E^2 = p c$$

lub po prostu $p = E/c$. Może wydawać się dziwne, że tyle czasu zajęło Einsteinowi dostrzeżenie tej prostej zależności, ale był on wtedy zajęty innymi sprawami, m.in. ogólną teorią względności. Jednakże gdy związek został już dostrzeżony, zgodność z teorią względności znacznie wzmocniła

wagę argumentów na rzecz teorii statystycznej. (Z innego punktu widzenia można argumentować, że skoro z teorii statystycznej wynika, iż $p = E/c$, to masa spoczynkowa cząstki światła musi być równa zeru.)

Właśnie ten rezultat przekonał Einsteina, że kwanty światła rzeczywiście istnieją. Określenie „foton” zostało wprowadzone dopiero w 1926 roku (przez Gilberta Lewisa z Berkeley w Kalifornii) i weszło do języka nauki po piątym Kongresie Solvaya, który odbył się w 1927 roku pod hasłem „Elektrony i fotony”. I choć Einstein już w 1917 roku jedyny wierzył w realność fotonów, moment na wprowadzenie tej nazwy był odpowiedni, bo dopiero sześć lat później amerykański fizyk Arthur Compton doświadczalnie potwierdził ich istnienie.

Compton pracował od 1913 roku nad promieniami X w kilku amerykańskich uniwersytetach oraz w Cavendish w Anglii. Seria doświadczeń przeprowadzonych w latach dwudziestych doprowadziła go do jednoznacznej konkluzji, że oddziaływanie promieni X i elektronów da się wyjaśnić tylko przy założeniu, że promienie X zachowują się w pewnym sensie jak cząstki - fotony. Kluczowe eksperymenty dotyczą sposobu, w jaki promieniowanie X jest rozpraszane przez elektrony, albo - w języku fizyki cząstek - oddziaływania fotonu i elektronu w trakcie ich zderzenia. Gdy promień X uderzy w elektron, ten zyskuje nieco energii oraz pędu i jest odrzucany pod pewnym kątem. Sam foton traci nieco energii i pędu i odbija się pod innym kątem, który można wyliczyć z prostych praw fizyki cząstek. Całe zjawisko przypomina uderzenie nieruchomej kuli bilardowej przez kulę toczącą się, a przekaz pędu odbywa się dokładnie tak jak w bilardzie. Jednakże w przypadku fotonu strata energii oznacza zmianę częstości promieniowania o wielkość $h\nu$ równą energii przekazanej elektronowi. Aby uzyskać całościowe wytłumaczenie eksperymentu, konieczny jest opis zarówno falowy, jak i cząsteczkowy. Okazuje się, że oddziaływanie w eksperymencie Comptona zgadza się dokładnie z tym opisem - kąty rozpraszania, zmiany częstości i odrzut fotonu idealnie pasują do koncepcji, według której promienie X poruszają się jak cząstki o energii $h\nu$. Zjawisko to nosi obecnie nazwę efektu Comptona. Odkrywcą otrzymał w 1927 roku Nagrodę Nobla²⁶, a od roku 1923 funkcjonuje w fizyce pojęcie fotonu jako cząstki niosącej energię i pęd (przez jakiś czas Bohr próbował bezskutecznie znaleźć alternatywne wyjaśnienie efektu Comptona, gdyż nie był całkowicie przekonany o konieczności stosowania równocześnie opisu cząstkowego i falowego w poprawnej teorii światła i uważał teorię cząstkową za rywalkę teorii falowej będącej podstawą jego modelu atomu). Jednak wszystkie świadectwa na rzecz falowej natury światła pozostały w mocy. Jak zauważył w 1924 roku Einstein: „zatem istnieją teraz dwie teorie światła, obie nieodzowne [...] i pozbawione jakiegokolwiek logicznego związku”.

Związek między obu teoriami stał się podstawą rozwoju mechaniki kwantowej w ciągu następnych kilku gorączkowych lat. Postęp dokonywał się równocześnie na kilku frontach, a nowe pomysły i nowe odkrycia pojawiały się nie zawsze w takiej kolejności, w jakiej były potrzebne do budowania nowej fizyki. Aby opowieść ta dała się zrelacjonować w sposób spójny, musi zostać

²⁶ Teoretyk Peter Debye wyliczył efekt Comptona niezależnie mniej więcej w tym samym czasie, i opublikował pracę, w której zasugerował przeprowadzenie eksperymentu. Zanim ta praca się ukazała, eksperyment Comptona był już wykonany.

uporządkowana, niekiedy kosztem historycznej chronologii. Zanim przystąpię do opisu samej mechaniki kwantowej, zajmę się wyjaśnieniem wszystkich istotnych koncepcji, mimo że teoria była rozwijana, nim niektóre z tych koncepcji stały się zrozumiałe. Nawet konsekwencje dualizmu falowo-korpuskularnego nie były w całości ogarniane, gdy mechanika kwantowa zaczęła nabierać kształtów - ale w logicznym opisie teorii kwantowej następnym krokiem po odkryciu dualnej natury światła musi być odkrycie dualnej teorii materii.

Dualizm falowo-korpuskularny

Odkrycie to było wynikiem sugestii francuskiego arystokraty Louisa de Broglie'a. Jest niezwykle proste, niemniej trafia w samo sedno. „Jeżeli fale świetlne zachowują się jak cząstki” - możemy wyobrazić sobie rozumowanie de Broglie'a - „to dlaczego elektrony nie mogłyby zachowywać się jak fale?” Gdyby de Broglie ograniczył się do tego stwierdzenia, nie byłby obecnie pamiętany jako jeden z ojców teorii kwantowej ani w 1929 roku nie otrzymałby Nagrody Nobla. Sam w sobie pomysł ten niewiele wnosi, zwłaszcza że podobne koncepcje były wcześniej wysuwane w związku z promieniami X, na długo przed pracami Comptona. Już w 1912 roku znakomity fizyk (i laureat Nagrody Nobla) W.H. Bragg tak skomentował ówczesny stan fizyki promieni X: „Wydaje mi się, że problem nie polega na wyborze jednej z dwóch teorii promieni X, lecz raczej na znalezieniu [...] jednej teorii, która łączy w sobie możliwości obu”²⁷. Wielkie osiągnięcie de Broglie'a polegało na uznaniu dualizmu falowo-cząsteczkowego jako potwierdzonego faktu i matematycznym opracowaniu tej koncepcji. Dzięki temu przewidział zachowanie fal materii i zasugerował metody eksperymentalnej weryfikacji swojej hipotezy. De Broglie, stosunkowo młody stażem członek wspólnoty fizyków teoretycznych, miał pod jednym względem znacznie ułatwiony start - jego starszy brat Maurice był znanym fizykiem doświadczalnym i to właśnie on naprowadził Louisa na trop wielkiego odkrycia. Louis wspominał później, że Maurice zawsze podkreślał „wagę i niezaprzeczną realność dwoistego charakteru cząstki i fali”. Gdy nadszedł odpowiedni czas, Louis de Broglie miał trochę szczęścia i znalazł się we właściwym miejscu w chwili, gdy koncepcyjnie prosta idea mogła przyczynić się do zasadniczej transformacji teoretycznej fizyki. Trzeba jednak podkreślić, że de Broglie potrafił wykorzystać swój pomysł.

Urodził się w 1892 roku. Tradycja rodzinna przeznaczała go do kariery w służbie cywilnej, ale gdy w 1910 roku wstąpił na uniwersytet w Paryżu, zapalał miłością do nauk ścisłych, w szczególności zaś polubił mechanikę kwantową, którą odkrył przed nim już brat (starszy o siedemnaście lat). Maurice otrzymał doktorat w 1908 roku, a jako jeden z sekretarzy naukowych pierwszego Kongresu Solvaya przekazywał wszystkie nowości bratu. Po kilku latach studia przerwała Louisowi obowiązkowa służba wojskowa, która z krótkiego epizodu w 1913 roku przerodziła się w trwający do 1919 roku udział w pierwszej wojnie światowej. Po wojnie de Broglie powrócił do przerwanych studiów nad teorią kwantową i zajął się tematyką, która miała doprowadzić go do odkrycia fundamentalnej jedności teorii cząstkowej i falowej. Przełom nadszedł w 1923 roku, gdy

²⁷ Cytaty prac de Broglie'a, jak również Bragga, pochodzą z książki M. Jammera *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*.

opublikował trzy prace we francuskim czasopiśmie „Comptes Rendus” oraz napisał angielskie streszczenie tych prac, które ukazało się w „Philosophical Magazine” w lutym 1924. Prace te nie znalazły większego odzewu, ale de Broglie natychmiast przystąpił do porządkowania swoich idei i zebrania ich w kompletnej postaci jako pracę doktorską. Egzamin na Sorbonie odbył się w październiku 1924, a tekst ukazał się w „Annales de Physique” na początku 1925 roku. Dopiero w tej formie zasadnicza treść jego prac stała się jasna i zapoczątkowała jedną z głównych przemian w fizyce w latach dwudziestych. Swoją pracę doktorską de Broglie zaczął od dwóch równań, które Einstein wyprowadził dla kwantów światła:

$$E = hv: \quad p = hv/c.$$

W obu tych równaniach własności „cząstek” (energia i pęd) znajdują się po lewej stronie, a własności fal (częstość) po prawej. De Broglie stwierdził, że niemożność definitywnego eksperymentalnego wyjaśnienia kwestii, czy światło jest falą czy cząstką wynika z faktu, że obie te własności są nierozzerwalnie splecione - nawet do zmierzenia pędu (własności cząstkowej) konieczna jest znajomość częstości (własności falowej). Dualizm ten dotyczył nie tylko fotonów. W tym czasie elektrony uważano za porządne cząstki, z wyjątkiem ich dziwnego zachowania w atomach, gdzie zajmowały wyłącznie wyróżnione poziomy energii. De Broglie zauważył, że występowanie elektronów na „orbitach” określonych przez liczby całkowite pod pewnymi względami przypomina zjawiska falowe. „Jedynie zjawiska w fizyce, w których odgrywają rolę liczby całkowite, to interferencja i mody normalne drgań - napisał w swojej pracy. - Ten fakt sugeruje, że elektronów także nie można uważać za zwykłe cząstki, lecz należy im przypisać własności okresowe”.

„Mody normalne drgań” to po prostu tony, które powstają, gdy drga struna skrzypiec albo powietrze w rurze organów. Mocno naciągnięta struna może drgać na przykład w taki sposób, że oba końce są nieruchome, a reszta wibruje. Wystarczy dotknąć środka struny, aby obie połowy zaczęły drgać w taki sam sposób, a środek pozostanie nieruchomy. Temu wyższemu „madowi” drgań odpowiada także wyższy ton (wyższa harmoniczna drgania podstawowego całej struny). Długość fali dla pierwszego modu jest dwukrotnie wyższa niż dla drugiego, a kolejne wyższe mody, odpowiadające coraz wyższym tonom, mogą powstać pod warunkiem, że długość struny jest (całkowitą) wielokrotnością długości fali. Zatem tylko niektóre fale, o określonych częstościach, pasują do struny.

To rzeczywiście przypomina sytuację w atomie, gdzie elektrony „pasują” do stanów odpowiadających poziomom energii opisanych liczbami kwantowymi: 1, 2, 3, 4 itd. Zamiast naciągniętej prostej struny wystarczy sobie wyobrazić strunę zwiniętą w koło, wzdłuż „orbity” wokół atomu. Fala może spokojnie biegać wokół, pod warunkiem, że obwód jest całkowitą wielokrotnością długości fali. Każda fala o długości nie „pasującej” dokładnie do struny byłaby niestabilna i uległa rozproszeniu wskutek interferencji z samą sobą. Głowa węża musi zawsze złapać ogon, w przeciwnym wypadku struna się rozpadnie, a wraz z nią cała analogia. Czy to mogłoby wyjaśnić kwantyzację stanów energii atomu, którym odpowiadałaby wibrująca fala

elektronowa o określonej częstotliwości? Podobnie jak wiele innych analogii opartych na modelu Bohra - w istocie, jak wszystkie nasze wyobrażenia atomu - obraz de Broglie'a był daleki od prawdy, ale pomógł lepiej zrozumieć świat kwantów.

Fale elektronowe

De Broglie uważał, że fale są stowarzyszone z cząstkami, i że cząstka taka jak foton jest jakby prowadzona przez stowarzyszoną z nią falę. Rezultatem jego rozważań był szczegółowy matematyczny opis zachowania światła, zawierający wnioski z falowych, a także z korpuskularnych eksperymentów. Recenzentom doktoratu de Broglie'a podobała się matematyczna forma pracy, ale sceptycznie przyjęli oni sugestię, że powiązanie fali z cząstką taką jak elektron ma fizyczne znaczenie - uważali to wyłącznie za matematyczny dziwołóg, z czym de Broglie się nie zgadzał. Zapytany przez jednego z egzaminatorów o możliwość eksperymentalnego wykrycia fal materii, odpowiedział, że byłoby to możliwe przez dyfrakcję wiązki elektronów na kryształach - podobnie jak w wypadku dyfrakcji światła, z tą różnicą, że zamiast dwóch szczelin przerwy między regularnie rozmieszczonymi atomami w kryształach tworzą „tablicę” szczelin, dostatecznie wąskich, aby ugiąć fale elektronowe, których częstota jest duża w porównaniu ze światłem, a nawet z promieniami X.

De Broglie wiedział, jaka długość fali wchodzi w rachubę, gdyż z połączenia dwóch równań Einsteina dla cząstek światła otrzymał bardzo prosty związek $p = hv/c$, z którym już się spotkaliśmy. Długość fali jest związana z częstotliwością przez $\lambda = c/v$, z czego wynika, że $p \lambda = h$, a to oznacza, że pęd pomnożony przez długość fali daje stałą Plancka. Im mniejsza jest długość fali, tym większy pęd cząstki, co czyni elektrony, z ich małą masą i odpowiednio małym pędem, najbardziej „falopodobnymi” cząstkami znanymi w owych czasach. Podobnie jak w wypadku światła lub fal na powierzchni morza efekty dyfrakcyjne występują tylko wtedy, gdy fala przechodzi przez otwór o rozmiarach porównywalnych z długością fali, co dla fal elektronowych oznacza rzeczywiście bardzo mały otwór, mniej więcej takich rozmiarów jak odległość między atomami w kryształach.

De Broglie nie wiedział, że efekty, które można najlepiej wytłumaczyć w kategoriach dyfrakcji elektronów, zostały zaobserwowane już w 1914 roku, gdy użyto wiązki elektronów do badania kryształów. Dwaj fizycy amerykańscy, Clinton Davisson i Charles Kunsman odkryli to dziwne zachowanie elektronów rozpraszanych na kryształach w latach 1922 i 1923, kiedy de Broglie dopiero formułował swoje idee. Nieświadomy tego de Broglie próbował przekonać doświadczalników do zweryfikowania hipotezy fal elektronowych. Tymczasem promotor jego pracy doktorskiej, Paul Langevin, wysłał kopię pracy Einsteinowi, który, jak można się było spodziewać, uznał ją za coś więcej niż matematyczny chwyt lub analogię i zdał sobie sprawę, że fale materii muszą być realne. Z kolei Einstein przesłał wiadomość Maxowi Bornowi w Getyndze, gdzie szef wydziału fizyki doświadczalnej, James Franck, stwierdził, że eksperymenty Davissona „już wykazały istnienie oczekiwanego efektu!”

Davisson i Kunsman, podobnie jak inni fizycy, sądzili, że przyczyną efektu rozpraszania jest struktura bombardowanych przez elektrony atomów, a nie natura samych elektronów. Walter Elsasser, student Borna, opublikował w 1925 roku krótką notę wyjaśniającą wyniki tych eksperymentów w kategoriach fal elektronowych, ale na eksperymentatorach nie zrobiła wrażenia reinterpretacja ich danych przez teoretyka, i to nikomu nie znanego, dwudziestojednoletniego studenta. Jeszcze w 1925 roku, pomimo istniejących doświadczalnych dowodów, idea fal materii była pojęciem dosyć mglistym. Dopiero gdy Erwin Schrödinger stworzył nową teorię struktury atomowej, opartą na idei de Broglie'a, ale idącą znacznie dalej, eksperymentatorzy poczuli nagłą potrzebę sprawdzenia hipotezy fali elektronowej. Eksperymenty dyfrakcyjne wykonane w 1927 roku w całości potwierdziły teorię de Broglie'a - elektron ulega ugięciu na siatkach krystalicznych dokładnie tak, jakby był falą. Odkrycia dokonały, niezależnie od siebie i przy użyciu odmiennej techniki eksperymentalnej, dwa zespoły: w USA Davisson i jego nowy współpracownik, Lester Germer, oraz w Anglii George Thomson (syn J.J. Thomsona) i jego student, Alexander Reid. Davisson, zlekceważywszy obliczenia Elsassera, zaprzepaścił szanse na indywidualny triumf i podzielił się Nagrodą Nobla z Thomsonem w 1937 roku. Jednak nawet Davisson musiał docenić interesujący historyczny paradoks, który znakomicie podsumowuje podstawową właściwość teorii kwantowej.

W 1906 roku J.J. Thomson otrzymał Nagrodę Nobla za odkrycie, że elektrony są cząstkami. W roku 1937 Nagrodę Nobla otrzymał jego syn za odkrycie, że elektrony są falami. Zarówno ojciec, jak i syn mieli rację, i obie nagrody były w pełni zasłużone. Elektrony są cząstkami; elektrony są falami. Od 1928 roku eksperymentalne dowody dualizmu falowo-korpuskularnego zaczęły się mnożyć. Właściwości falowe (także dyfrakcyjne) zostały doświadczalnie potwierdzone dla innych cząstek łącznie z protonem i neutronem²⁸, a w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych Tony Klein wraz z kolegami z uniwersytetu w Melbourne powtórzył niektóre z klasycznych dziewiętnastowiecznych eksperymentów potwierdzających falową naturę światła, ale zamiast światła zastosował wiązkę neutronów²⁹.

Rozstanie z przeszłością

Całkowite zerwanie z fizyką klasyczną następuje w momencie, gdy uświadomimy sobie, że nie tylko fotony i elektrony, ale wszystkie „cząstki” i wszystkie „fale” są w rzeczywistości połączeniem fali i cząstki. Tak się składa, że w naszym codziennym życiu składnik cząstkowy całkowicie dominuje w przypadku, powiedzmy, kuli bilardowej albo domu. Czynniki falowy, aczkolwiek całkowicie nieistotny, jest mimo to nadal obecny, zgodnie z zależnością $p\lambda = h$. W skali atomowej, gdzie aspekty cząstkowy i falowy są jednakowo istotne, przedmioty nie zachowują się w sposób dla nas zrozumiały na podstawie naszego codziennego doświadczenia. To nie znaczy, że atom Bohra z jego „orbitami” jest fałszywym obrazem rzeczywistości. Wszystkie obrazy są fałszywe i nie

²⁸ Neutron został wykryty w 1932 roku przez Jamesa Chadwicka, który otrzymał Nagrodę Nobla w roku 1935, a więc dwa lata wcześniej niż Davisson i Thomson za ich odkrycie z 1927 roku.

²⁹ Te doświadczenia mają potencjalne praktyczne zastosowania, łącznie z możliwością zbudowania mikroskopu neutronowego. Por. „New Scientist”, 2 września 1982, s. 631.

istnieje fizyczna analogia, która mogłaby pomóc zrozumieć, co się dzieje wewnątrz atomu. Atomy zachowują się jak atomy, nic poza tym.

Sir Arthur Eddington błyskotliwie podsumował tę sytuację w swojej książce *The Nature of the Physical World*, opublikowanej w 1929 roku. „Żadnej znanej koncepcji nie da się zbudować wokół elektronu”, a nasz najlepszy opis atomu sprowadza się do stwierdzenia, że „coś nieznanego robi nie wiadomo co”. Eddington zauważa, że „to nie brzmi jak szczególnie pouczająca teoria. Gdzieś czytałem coś w tym rodzaju:

Jaszmije smukwijne Swidrokrętnie na zegwniku wężały”.

Aczkolwiek nie wiemy, co elektrony robią w atomach, wiemy, że istotna jest liczba elektronów i w tym tkwi sedno sprawy. Dodanie paru liczb nadaje Dżabbersmokowi³⁰ naukowego charakteru - „Osiem jasmij wężało i rykoświstąkało na zegwniku tlenu; siedem na zegwniku azotu [...] jeśli jedna z jego jasmij ucieknie, tlen będzie udawał azot”.

To nie jest żartobliwa uwaga. Pod warunkiem, że nie zmienimy liczb, to, jak zauważył Eddington ponad pięćdziesiąt lat temu, moglibyśmy przełożyć podstawy fizyki na język Jabberwocky'ego. Odrzucenie instynktownego skojarzenia atomów z twardymi kulkami, a elektronów z małutkimi cząstkami nic by nas nie kosztowało, a prawdopodobnie przyniosło same korzyści. Za dowód niech wystarczy nieporozumienie związane z własnością elektronu zwaną spinem, w niczym nie przypominającą zachowania dziecięcego bąka ani obrotu Ziemi wokół własnej osi.

Jedna z zagadek spektroskopii atomu, której prosty model Bohra nie potrafił wytłumaczyć, wiąże się z rozszczepianiem linii widmowych na multiplety, czyli grupy blisko położonych linii, w miejscach, gdzie model przewidywał pojedynczą linię. Każda linia widmowa jest związana z przejściem z jednego stanu atomu do innego, więc liczba linii w widmie określa liczbę stanów w atomie, czyli ile jest „stopni” na kwantowych schodach, a położenie linii w widmie odzwierciedla odległości między stopniami. We wczesnych latach dwudziestych na podstawie badań widm atomowych fizycy wysunęli kilka możliwych wyjaśnień struktury multipletowej. Okazało się, że najlepsze wyjaśnienie podał Wolfgang Pauli, a przypisywało ono elektronowi cztery oddzielne liczby kwantowe. Był to rok 1924, gdy fizycy wciąż uważali elektron za cząstkę i próbowali wyjaśnić jego kwantowe własności w kategoriach codziennego życia. Trzy z tych czterech liczb były już uwzględnione w modelu Bohra i określały orbitalny moment pędu elektronu (który jest związany z prędkością obiegu orbity atomowej przez elektron), kształt orbity i jej orientację. Czwarta liczba musiała mieć związek z jakąś inną własnością elektronu, która może przybierać tylko dwie wartości, jeżeli ma odzwierciedlać obserwowane rozszczepienia linii widmowych.

Nie trzeba było dużo czasu, aby ktoś wpadł na pomysł, że liczba Pauliego opisuje „wewnętrzny kręt” elektronu³¹, który może być skierowany „w dół” lub „w górę”, dając pożądaną dwuwartościową liczbę kwantową. Pierwszy zaproponował to rozwiązanie Ralph Kronig, młody fizyk przybyły do

³⁰ Cytaty z wiersza *Jabberwocky* z książki *O tym, co Alicja odkryła po drugiej stronie lustra* Lewisa Carolla pochodzą z tłumaczenia Macieja Słomczyńskiego, Wydawnictwo Dolnośląskie, Wrocław 1990 (przyp. tłum.).

³¹ *Spin* (ang.) - moment pędu związany z wirowaniem wokół własnej osi, przedstawiany w fizyce jako wektor ustawiony wzdłuż osi wirowania (przyp. tłum.).

Europy tuż po zakończeniu studiów doktoranckich na Uniwersytecie Columbia³². Według niego elektron ma wewnętrzny kręt o wartości równej połowie naturalnej jednostki ($h/2\pi$)³³, który może ustawić się albo równolegle, albo antyrównolegle do pola magnetycznego atomu. Ku jego zdumieniu sam Pauli był przeciwny temu pomysłowi, głównie dlatego, że spinu nie dało się pogodzić z koncepcją elektronu jako cząstki w ramach teorii relatywistycznej. Podobnie jak w klasycznej teorii elektromagnetycznej elektron na orbicie wokół jądra nie mógł być stabilny, tak obdarzony wewnętrznym krętem elektron nie mógł być stabilny w teorii relatywistycznej. Być może Pauli powinien być bardziej otwarty na nowe pomysły, ale w rezultacie Kronig zarzucił swój pomysł i nigdy go nie ogłosił. Jednakże niecały rok później na ten sam pomysł wpadli George Uhlenbeck i Samuel Goudsmit z Instytutu Fizyki Teoretycznej w Lejdzie. Swoją koncepcję opublikowali pod koniec 1925 roku w niemieckim czasopiśmie „Die Naturwissenschaften” oraz na początku 1926 roku w „Nature”.

Teoria wirującego elektronu została wkrótce na tyle udoskonalona, że całkowicie wyjaśniła kłopotliwe rozszczepienia linii widmowych. W marcu 1926 roku przekonał się do niej sam Pauli. Ale co to jest spin? Jeśli spróbujemy to przedstawić w zwykłym języku, pojęcie to wymyka nam się, podobnie jak wiele innych kwantowych pojęć. Z jednego z takich „wyjaśnień” możemy się dowiedzieć, że spin elektronu nie jest podobny do ruchu wirującego bąka (co samo w sobie jest słusznym stwierdzeniem), gdyż elektron musi wykonać dwa obroty, zanim wróci do pozycji wyjściowej. Zatem, w jaki sposób „wiruje” fala elektronowa? Nikt nie był bardziej zadowolony niż Pauli, gdy w 1932 roku Bohr zdołał wykazać, że spinu elektronu nie da się zmierzyć za pomocą żadnego klasycznego eksperymentu, na przykład odchylenia wiązki elektronów w polu magnetycznym³⁴. Spin nie ma żadnego klasycznego odpowiednika i pojawia się tylko w oddziaływaniach kwantowych, takich jak te, które są odpowiedzialne za rozszczepienie linii widmowych. O ile łatwiej byłoby Pauliemu i jego kolegom, próbującym w latach dwudziestych zrozumieć atom, gdyby od samego początku mieli do czynienia z „węzaniem” zamiast ze „spinem” elektronu!

Czy nam się to podoba czy nie, określenie „spin” pozostało. Kampania na rzecz usunięcia klasycznej terminologii z fizyki kwantowej ma niewielkie szanse powodzenia, ale od tej chwili, jeśli zaskoczy nas znajomy wyraz w nieznanym kontekście, należy spróbować zamienić go na Dżabbersmoka - może okazać się mniej groźny. Nikt nie rozumie, co „naprawdę” dzieje się w atomie, ale cztery liczby kwantowe Pauliego rzeczywiście wyjaśniają pewne istotne właściwości „smukwinych jasmij” w różnych „zegwnikach”.

³² Arthur Compton już w 1920 roku rozważał możliwość, że elektron jest obdarzony spinem, ale to było w nieco innym kontekście i Kronig o tym nie wiedział.

³³ Czynnikiem 2π występuje dlatego, gdyż w pełnym kącie 360° jest 2π radianów. Wielkość $h/2\pi$ jest zwykle oznaczana przez \hbar . Więcej szczegółów w dalszej części książki.

³⁴ Istnieje wiele zjawisk, w których różne stany spinowe cząstek dają makroskopowo różne wyniki eksperymentalne, łącznie z odchyleniem strumienia atomów w polu magnetycznym w tzw. doświadczeniu Stern-Gerlacha. Autor ma zapewne na myśli fakt, że w odróżnieniu od pędu, energii i wielu innych własności fizycznych, spin jest wielkością kwantową, której nie da się jednoznacznie zdefiniować dla ciał makroskopowych (przyp. tłum.).

Zakaz Pauliego

Wolfgang Pauli był jednym z najwybitniejszych spośród wybitnych uczonych, którzy stworzyli mechanikę kwantową. Urodzony w 1900 roku w Wiedniu, w 1918 roku wstąpił na uniwersytet w Monachium, przynosząc ze sobą reputację zdolnego matematyka i gotowy artykuł z ogólnej teorii względności (którym natychmiast zainteresował się Einstein), opublikowany w 1919 roku. W takim tempie chłonał fizykę - na wykładach uniwersyteckich, w Instytucie Fizyki Teoretycznej, jak również samodzielnie - i opanował teorię względności, że w 1920 roku przydzielono mu zadanie opracowania obszernego hasła na temat tej teorii dla prestiżowej encyklopedii matematyki. Dzięki temu znakomitemu artykułowi osoba dwudziestoletniego studenta stała się znana całej społeczności naukowej. W 1921 roku został na krótko asystentem Maxa Borna w Getyndze, następnie przeniósł się do Hamburga, a potem do Instytutu Bohra w Danii. Born powetował sobie stratę, przyjmując nowego, równie utalentowanego asystenta, Wernera Heisenberga, który odegrał kluczową rolę w rozwoju teorii kwantowej³⁵.

Jeszcze zanim czwarta liczba kwantowa Pauliego została nazwana spinem, udało mu się, w 1925 roku, wyjaśnić za jej pomocą jedną z wielkich zagadek atomu Bohra. W przypadku wodoru pojedynczy elektron znajduje się oczywiście w najniższym możliwym stanie energetycznym, na dole kwantowych schodów. Jeżeli zostanie pobudzony, na przykład przez zderzenie, może przeskoczyć na wyższy stopień, a następnie spaść z powrotem, emitując przy tym kwant promieniowania. Wszakże w cięższych atomach, gdzie jest więcej elektronów, nie wszystkie zajmują stan podstawowy, lecz rozsiadają się na kolejnych stopniach schodów. Bohr umieścił elektrony na powłokach wokół jądra; nowe elektrony kładł na powłokę o najniższej energii (dopóki było na niej miejsce), potem na następną i tak dalej. W ten sposób skonstruował układ okresowy pierwiastków i wytłumaczył wiele chemicznych zagadek. Nie wyjaśnił jednak, w jaki sposób i dlaczego powłoki się zapełniają, ani dlaczego pierwsza powłoka przyjmuje tylko dwa elektrony, druga osiem i tak dalej.

Każdej powłoce Bohra odpowiada zestaw liczb kwantowych i w 1925 roku Pauli zauważył, że wraz z wprowadzeniem czwartej liczby kwantowej liczba elektronów na powłoce stała się dokładnie równa liczbie różnych kombinacji liczb kwantowych odpowiadających danej powłoce. Na tej podstawie sformułował zasadę noszącą obecnie nazwę zakazu Pauliego, zgodnie z którą żadne dwa elektrony nie mogą mieć tego samego zestawu liczb kwantowych. To wyjaśniało dlaczego elektrony w taki, a nie inny sposób zapełniają kolejne powłoki w coraz cięższych atomach.

Zasada Pauliego i spin elektronu zostały odkryte przedwcześnie i zostały w pełni przyswojone przez nową fizykę dopiero pod koniec lat dwudziestych, kiedy fizyka ta w pełni się ukształtowała. W latach 1925-1926 tempo rozwoju fizyki było tak szybkie, że zasada Pauliego czasami jest niedoceniana, mimo że jest to pojęcie równie fundamentalne i o równie daleko idących

³⁵ Por. np. M. Born, *The Born-Einstein Letters*. W liście z datą 12 lutego 1921 roku, Born pisze: „Artykuł Pauliego dla Encyklopedii jest ponoć gotowy i mówi się, że waży 2 V₂ kilograma. To powinno być wskazówką co do jego intelektualnej wagi. Ten smarkacz jest nie tylko zdolny, ale także pracowity”. Zdolny smarkacz otrzymał doktorat w 1921 roku, na krótko przed asystenturą u Borna.

konsekwencjach jak teoria względności, i znajduje szerokie zastosowanie w całej fizyce. Zakaz Pauliego stosuje się do wszystkich cząstek, których spin jest liczbą połówkową: $(1/2)\hbar$, $(3/2)\hbar$, $(5/2)\hbar$ i tak dalej. Cząstki, których spin jest równy zeru (jak fotony) lub jest liczbą całkowitą (\hbar , $2\hbar$, $3\hbar$ itd.), zachowują się zupełnie inaczej, zgodnie z innymi regułami. Zestaw reguł dla cząstek o spinie połówkowym nosi nazwę statystyki Fermiego-Diraca, od nazwisk Enrico Fermiego i Paula Diraca, którzy wyprowadzili te reguły w 1925 i 1926 roku. Cząstki te nazywamy fermionami. Zestaw reguł dla cząstek o spinie całkowitym nosi nazwę statystyki Bosego-Einsteina, od nazwisk dwóch ludzi, którzy je wprowadzili, a cząstki nazywają się bozony.

Statystyka Bosego-Einsteina została odkryta w tym samym czasie co fale de Broglie'a, efekt Comptona i spin elektronu (które wywołały tak wielkie podniecenie w środowisku fizyków) i także całkowicie zrywała z ideami klasycznej fizyki. Był to ostatni wielki wkład Einsteina do teorii kwantowej (co więcej, jego ostatnie wielkie osiągnięcie naukowe).

Satyendra Bose urodził się w 1894 roku w Kalkucie. W roku 1924 był wykładowcą fizyki na nowo powstałym uniwersytecie w Dhace. Siedząc z oddali prace Plancka, Einsteina, Bohra i Sommerfelda i mając świadomość wciąż niewystarczających podstaw prawa Plancka, Bose próbował wyprowadzić prawo promieniowania ciała doskonale czarnego w nowy sposób, wychodząc od założenia, że światło jest złożone z cząstek (obecnie zwanych fotonami). Udało mu się stworzyć bardzo proste wyprowadzenie, oparte na bezmasowych cząstkach, spełniające szczególnego rodzaju statystykę; kopię swojej pracy wysłał Einsteinowi, z prośbą o przekazanie jej do publikacji w „Zeitschrift für Physik”. Praca zrobiła na Einsteinie takie wrażenie, że sam przetłumaczył ją na język niemiecki i wysłał do druku wraz z rekomendacją, co zagwarantowało, że ukazała się w druku w sierpniu 1924 roku. Usuwając wszystkie elementy teorii klasycznej i wyprowadzając prawo Plancka z połączenia kwantów światła - traktowanych jako cząstki relatywistyczne z zerową masą - i metod statystycznych, Bose ostatecznie oderwał teorię kwantową od jej klasycznych poprzedników. Promieniowanie mogło teraz być traktowane jako kwantowy gaz, a statystyka polegała na liczeniu cząstek, a nie częstości.

Einstein rozwinął tę statystykę i zastosował ją do (wówczas całkowicie hipotetycznego) przypadku zbioru atomów - w formie gazu lub cieczy - spełniających te same reguły. Statystyka okazała się nieodpowiednia dla normalnych gazów w temperaturze pokojowej, ale bardzo dokładnie opisywała dziwaczne własności nadciekłego helu - płynu schłodzonego do temperatury bliskiej absolutnego zera, -273°C . Statystyka Fermiego-Diraca pojawiła się w 1926 roku i upłynęło trochę czasu, zanim fizycy rozstrzygnęli, które reguły, gdzie się stosuje i docenili znaczenie połówkowego spinu³⁶.

Nie musimy w tym miejscu zagłębiać się we wszystkie subtelności, ale rozróżnienie między fermionami i bozonami jest istotne i dosyć łatwo je zrozumieć. Kilka lat temu oglądałem sztukę z udziałem komika Spike'a Milligana. Tuż przed podniesieniem kurtyny na scenie pojawił się sam

³⁶ Nagroda Nobla z fizyki w 1996 roku została przyznana za przeprowadzone w 1972 roku doświadczenie, w którym David M. Lee, Douglas D. Osheroff i Robert C. Richardson z Cornell University odkryli efekt nadciekłości w izotopie helu-3 (przyp. tłum.).

mistrz i spojrział ze smutkiem na wolne miejsca w najdroższym sektorze widowni, tuż przy scenie. „W dzisiejszych czasach nie ma na nie chętnych - rzekł - możecie więc przesunąć się wszyscy bliżej, żebym was lepiej widział”. Zgodnie z jego sugestią widzowie przemieścili się o kilka rzędów do przodu, wypełniając miejsca przy scenie, a zostawiając puste miejsca z tyłu. Zachowaliśmy się jak miłe, dobrze wychowane fermiony - każdy widz zajął jedno miejsce (jeden stan kwantowy), poczynając od najbardziej pożądanego „stanu podstawowego” w pobliżu sceny i stopniowo wypełniając dalsze miejsca.

Porównajmy tę sytuację z koncertem Bruce'a Springsteena, na którym niedawno byłem. Każde krzesło było zajęte, ale pomiędzy pierwszym rzędem a sceną był mały odstęp. Gdy zapaliły się światła na scenie i zespół zaczął grać *Born to Run*, widownia zerwała się z miejsc i rzuciła do przodu, tłocząc się przy samej scenie. Wszystkie „cząstki” skupiły się w tym samym „stanie” w sposób nierozróżnialny. Na tym polega różnica między fermionami a bozonami - fermiony stosują się do zakazu Pauliego, bozony nie.

Wszystkie cząstki „materialne”, do których jesteśmy przyzwyczajeni - elektrony, protony, neutrony - są fermionami i bez zasady Fermiego nie byłoby bogactwa i różnorodności pierwiastków chemicznych i wszystkich własności otaczającego nas świata. Bozony, do których zaliczają się m.in. fotony, są cząstkami bardziej ulotnymi. Prawo promieniowania ciała doskonale czarnego jest bezpośrednim skutkiem dążenia wszystkich fotonów do zajęcia tego samego stanu energii. Atomy helu mogą naśladować własności bozonów i w pewnych warunkach występować w stanie nadciekłym, ponieważ każdy atom He zawiera dwa protony i dwa neutrony, a i ich połówkowe spiny tak się ustawiają, aby dać w sumie zero. Ponadto w oddziaływaniach między cząstkami zachowana jest liczba fermionów - nie da się zwiększyć ogólnej liczby fermionów, podczas gdy bozony można produkować w olbrzymich ilościach, co wie każdy, kto kiedykolwiek włączył światło.

Co dalej?

W 1925 roku teoria kwantowa znajdowała się w stanie kompletnego chaosu, mimo że z perspektywy lat osiemdziesiątych wydaje się spójna i uporządkowana. Każdy samodzielnie wyrąbywał ścieżkę przez dżunglę, ale żadna ze ścieżek nie dawała zbyt wiele nadziei na wyraźny postęp. Czołowi badacze doskonale o tym wiedzieli, czemu dawali publicznie wyraz. Wielki krok naprzód miał się stać udziałem nowego (z jednym wyjątkiem) pokolenia, któremu przyszło żyć po pierwszej wojnie światowej i które było (być może dlatego) otwarte na nowe idee. Max Born następująco skomentował sytuację w 1924 roku: „obecnie mamy tylko kilka niejasnych sugestii”, w jaki sposób należy zmodyfikować klasyczne prawa, aby wyjaśnić własności atomów. W podręczniku do teorii atomu, opublikowanym w 1925 roku, Born zapowiada drugi tom³⁷, jako kontynuację i uzupełnienie tomu pierwszego, ale zastrzega się, że „nie zostanie on napisany jeszcze przez wiele lat”³⁸. Heisenberg, po nieudanej próbie obliczenia struktury atomu helu, na

³⁷ W 1930 roku w Berlinie ukazał się drugi tom *Vorlesungen tiber Atommechanik* [Wykłady z mechaniki atomu] Maxa Borna (przyp. tłum.).

³⁸ Cytaty w tej części pochodzą z epilogu tomu 1 pracy J. Mehry i H. Rechenbergo *The Historical Developmem of Quantum Theory*.

początku 1923 roku napisał do Pauliego: „Co za nędza!” - to określenie Pauli powtórzył w liście do Sommerfelda w lecie tego samego roku, pisząc: „Teoria [...] atomów posiadających więcej niż jeden elektron jest w tak nędznym stanie”. W maju 1925 roku Pauli napisał do Kroniga, że „w chwili obecnej w fizyce panuje ponownie wielki zamęt”, a w roku 1925 sam Bohr równie posępnie wypowiedział się o licznych problemach komplikujących jego model atomu. Jeszcze w czerwcu 1926 roku Wilhelm Wien, którego prawo ciała doskonale czarnego posłużyło Planckowi jako trampolina do skoku w nieznane, w liście do Schrödingera wymienił „trzęsawisko liczb całkowitych i połówkowych, kwantowe nieciągłości i arbitralne stosowanie teorii klasycznej”. Wszyscy wielcy przedstawiciele teorii kwantowej byli świadomi piętujących się trudności; spośród wielkich nazwisk tylko Henriego Poincarego nie było już na świecie. Lorentz, Planck, J.J.Thomson, Bohr, Einstein i Born wciąż należeli do autorytetów, podczas gdy Pauli, Heisenberg, Dirac i inni zaczęli wywierać wpływ. Największymi autorytetami byli Einstein i Bohr, ale około 1925 roku zaczęli się wyraźnie różnić w poglądach naukowych. Początkowo jednym z największych oponentów kwantu światła był Bohr. Później, gdy Einsteina zaczęła niepokoić rola prawdopodobieństwa w teorii kwantowej, Bohr stał się jej wielkim zwolennikiem. Metody statystyczne (jak na ironię wprowadzone przez Einsteina) stały się fundamentem teorii kwantowej, ale już w 1920 roku Einstein napisał do Borna: „Ten cały interes z przyczynowością także nie daje mi spokoju [...] muszę przyznać, że [...] brakuje mi odwagi, aby bronić swoich własnych przekonań”. Dialog między Einsteinem i Bohrem na ten temat trwał przez trzydzieści pięć lat, aż do śmierci Einsteina³⁹.

Max Jammer opisuje sytuację na początku 1925 roku jako „opłakaną mieszankę hipotez, zasad, twierdzeń i reguł obliczeniowych”⁴⁰. Każdy problem w fizyce kwantowej musiał najpierw być „rozwiązany” przy użyciu fizyki klasycznej, a następnie przerobiony przez pieczołowite podstawienie liczb kwantowych, oparte bardziej na intuicji i zgadywaniu niż na chłodnym rozumowaniu. Teoria kwantowa nie była ani autonomiczna, ani logicznie spójna i pasożytowała na klasycznej fizyce jak egzotyczny kwiat pozbawiony korzeni. Nic dziwnego, że Born sądził, iż minie wiele lat, zanim będzie mógł napisać drugi tom o fizyce atomowej. A jednak, stosownie do dziwnej natury kwantu, w ciągu kilku miesięcy od pełnych niepewności początków roku 1925 zaskoczona społeczność naukowa została obdarowana nie jedną, lecz dwiema kompletnymi, niezależnymi, logicznymi i dobrze ugruntowanymi teoriami kwantowymi.

³⁹ Einstein wyraził swoje wątpliwości także w korespondencji z Bornem. Powyższy cytat pochodzi z: M. Born, *Born-Einstein Letters*, s. 23.

⁴⁰ M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, s. 196.

Rozdział szósty

Macierze i fale

Werner Heisenberg urodził się 5 grudnia 1901 roku w Wurzburgu. W 1920 wstąpił na uniwersytet w Monachium, gdzie studiował fizykę u Arnolda Sommerfelda, jednego z czołowych fizyków owych czasów, który ściśle współpracował w badaniach nad modelem atomu Bohra. Heisenberg od razu otrzymał zadanie z teorii kwantowej, polegające na znalezieniu liczb kwantowych, które mogłyby wytłumaczyć niektóre rozszczepienia linii widmowych na pary (dublety). Po kilku tygodniach znalazł odpowiedź - cała struktura może być wytłumaczona za pomocą połówkowych liczb kwantowych. Młody, pozbawiony uprzedzeń student znalazł najprostsze rozwiązanie problemu, ale jego koledzy oraz promotor Sommerfeld byli przerażeni. Całkowite liczby kwantowe były dla Sommerfelda niepodważalnym dogmatem; spekulacje młodego studenta zostały niebawem poddane miazdzącej krytyce. Wśród ekspertów panowała obawa, że wprowadzając do równań liczby połówkowe, otworzy się drzwi dla kolejnych ułamków - ćwiartek, części ósemkowych, szesnastkowych itd. - niszcząc fundamenty teorii kwantowej. Okazało się, że się mylili.

Kilka miesięcy później Alfred Lande, fizyk starszy i o większym stażu niż Heisenberg, wpadł na ten sam pomysł i opublikował go. Później stało się oczywiste, że liczby połówkowe są niezbędne w pełnej wersji teorii kwantowej, gdyż opisują własność elektronu zwaną spinem. Te obiekty, które są obdarzone całkowitym lub zerowym spinem, na przykład fotony, stosują się do statystyki Bosego-Einsteina, natomiast te, które mają spin połówkowy - do statystyki Fermiego-Diraca. Połówkowy spin elektronu jest bezpośrednio związany ze strukturą atomu i z układem okresowym pierwiastków. W dalszym ciągu obowiązuje zasada, że liczby kwantowe zmieniają się o wielkość całkowitą, ale przeskok od $1/2$ do $3/2$ albo od $5/2$ do $9/2$ jest tak samo dozwolony jak od 1 do 2 albo od 7 do 12. Wprawdzie pomysł ten nie został przypisany Heisenbergowi, ale z historii tej płynie morał, że, podobnie jak młodzi ludzie poprzedniego pokolenia stworzyli pierwszą teorię kwantową, w latach dwudziestych nadszedł czas dla młodych umysłów nie ograniczonych przekonaniem, że „ogólnie uznane” idee muszą być prawdziwe. W ciągu następnych kilku lat Heisenberg powetował sobie stratę jednego z mniej istotnych „pierwszeństw”.

Spędziwszy jeden semestr u Borna w Getyndze, gdzie wziął udział w Festiwalu Bohra, Heisenberg wrócił do Monachium, aby ukończyć pracę doktorską, którą obronił w 1923 roku - w wieku niespełna dwudziestu dwóch lat. W tym czasie Wolfgang Pauli, bliski przyjaciel Heisenberga, równie jak on utalentowany i także były student Sommerfelda, ruszał w dalszą drogę po krótkiej asystenturze u Borna w Getyndze, i Heisenberg w 1924 roku zajął jego miejsce. Posada ta umożliwiła mu kilkumiesięczną pracę z Bohrem w Kopenhadze i w rezultacie w 1925 roku był lepiej niż ktokolwiek inny przygotowany do stworzenia logicznej teorii kwantowej, której odkrycie wszyscy fizycy przewidywali, ale nikt nie spodziewał się jej w tak krótkim czasie.

Dokonany przez Heisenberga przełom był oparty na idei zapożyczony z Getyngi (nikt już nie jest całkowicie pewien, kto pierwszy ją wysunął), zawierającej stwierdzenie, że teoria fizyczna powinna zajmować się jedynie tym, co da się zaobserwować eksperymentalnie. Brzmi to jak truizm, ale w istocie jest bardzo poważnym postulatem. Eksperyment, w którym „obserwujemy”, powiedzmy, elektrony w atomie, nie daje nam obrazu małych twardych kulek orbitujących wokół jądra - nie sposób zobaczyć orbity, a obecność linii widmowych mówi nam, co się dzieje z elektronami, gdy przeskakują z jednego stanu energii (w języku Bohra - z orbity) na inny. Wszystkie obserwowalne właściwości elektronów i atomów wiążą się z dwoma stanami, a pojęcie orbity elektronowej jest przypisane do obserwacji przez analogię do zjawisk, które widzimy na co dzień wokół siebie (pamiętamy jasmije smukwijne). Heisenberg zignorował tę zaciemniającą otoczkę, zbudowaną z analogii opartych na potocznych wyobrażeniach, i skupił się na matematyce, która opisuje nie jeden „stan” atomu lub elektronu, lecz związki pomiędzy parami stanów.

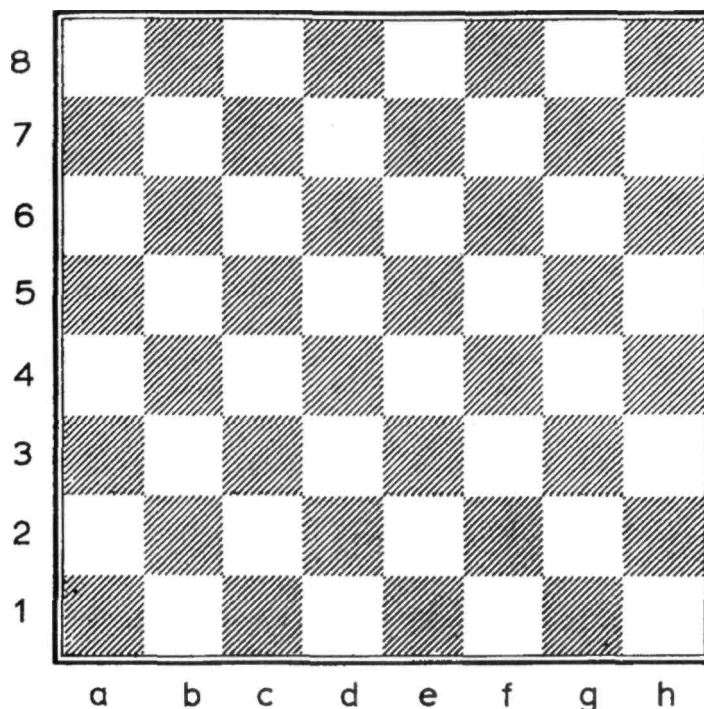
Odkrycie na wyspie Heligoland

Często opowiadana historia mówi o tym, jak w maju 1925 roku Heisenberg został powalony przez epidemię kataru siennego i, aby wydobrzeć, wybrał się na skalistą wyspę Heligoland, gdzie pracowicie próbował zinterpretować matematyczne aspekty teorii kwantowej. Spokój pozbawionej rozrywek wyspy (i wyleczony katar) stwarzał idealne warunki do intensywnej pracy. W autobiograficznej książce *Physics and Beyond* opisał swoje wrażenia, gdy liczby zaczęły się układać w zrozumiałe wzór i o trzeciej nad ranem pewnej nocy nie miał już „wątpliwości co do matematycznej jednoznaczności i spójności mechaniki kwantowej, do której moje obliczenia prowadziły. „W pierwszej chwili byłem głęboko zatrużony. Miałem wrażenie, że przez powierzchnię zjawisk atomowych patrzę w głąb dziwnie pięknego wnętrza. Świadomość, że muszę teraz zgłębić to bogactwo matematycznych struktur, które natura przede mną tak szczerze rozwinęła, przyprawiała mnie niemal o zawrót głowy”.

Po powrocie do Getyngi Heisenberg spędził trzy tygodnie, przygotowując swoją pracę do publikacji. Następnie wysłał kopię staremu przyjacielowi Pauliemu, z prośbą o opinię, czy praca jest sensowna. Odpowiedź Pauliego była entuzjastyczna, ale Heisenberg, wyczerpany intensywnym wysiłkiem, nadal nie był pewny, czy może ją opublikować i pozostawił decyzję Bomowi, a sam wyruszył w czerwcu 1925 roku do Lejdy i Cambridge z serią wykładów. Jak na ironię podczas tych wykładów nie wspominał o swoich najnowszych rezultatach, więc do tamtejszych słuchaczy wieści dotarły inną drogą.

Born był całkowicie usatysfakcjonowany i wysłał pracę Heisenberga do „Zeitschrift fur Physik”. Niemal natychmiast zorientował się, na co natknął się Heisenberg. Matematyka związana z opisem dwóch stanów atomu nie da się wyrazić za pomocą zwykłych liczb, lecz wymaga użycia układów liczb. Heisenberg wyobrażał je sobie jako tablice, których istotę najlepiej oddaje porównanie z szachownicą, gdzie 64 pola można ponumerować liczbami od 1 do 64, ale szachiści wolą użyć opisu, w którym pionowe kolumny pól oznaczają się literami a, b, c, d, e, f, g, h, natomiast poziome

wiersze liczbami 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8. Każde pole na szachownicy można jednoznacznie zidentyfikować, podając odpowiednią parę oznaczeń: na polu a1 stoi początkowo wieża, na polu g2 pionek i tak dalej. Podobnie jak szachownica tablice Heisenberga miały formę dwuwymiarowych tablic liczbowych, ponieważ jego obliczenia dotyczyły oddziaływania dwóch stanów atomowych. Obliczenia te wymagały m.in. mnożenia dwóch takich tablic i Heisenberg cierpliwie opracował odpowiednie matematyczne techniki wykonywania tej operacji. W rezultacie uzyskał bardzo osobliwy rezultat, tak zadziwiający, że był on jednym z powodów jego wątpliwości, czy należy opublikować pracę. Gdy dwie takie tablice pomnoży się przez siebie, wynik zależy od kolejności wykonywania mnożenia.



Ryc. 6.1. Każde pole na szachownicy można jednoznacznie zidentyfikować, podając numer wiersza oraz literę odpowiadającą kolumnie. Kwantowo-mechaniczne stany energii również są określane przez odpowiedni zestaw liczb kwantowych (niektórym z nich przypisane są litery)

To rzeczywiście dziwne, jeśli sobie uświadomimy, że to tak, jakby 2×3 nie było równe 3×2 , albo w kategoriach algebraicznych $axb \neq bxa$. Osobliwość ta dniami i nocami dręczyła Borna przekonanego, że u jej podłoża musi leżeć coś bardzo fundamentalnego. Ośnienie przyszło niespodziewanie. Matematyczne tablice liczb, tak pracowicie konstruowane przez Heisenberga, były wcześniej znane w matematyce pod nazwą macierzy. Istniała cała teoria wykonywania operacji matematycznych na takich obiektach, a Born studiował ją w czasach, gdy był studentem we Wrocławiu. Nie jest więc dziwne, że Born pamiętał to jeszcze po dwudziestu latach, gdyż pewna podstawowa własność macierzy zawsze wywiera głębokie wrażenie na studentach, gdy po raz pierwszy się z nią stykają - wynik mnożenia macierzy zależy od kolejności, w której wykona się działanie. W języku matematyki własność tę wyrażamy, mówiąc, że macierze nie komutują.

-2	-3	-4	-5	-6	-4	-3	-2
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1
2	3	4	5	6	4	3	2

Ryc. 6.2. „Stan” każdego pola szachownicy jest określony przez figurę znajdującą się na tym polu. W powyższym zapisie pionkowi odpowiada liczba 1, wieży liczba 2 i tak dalej; białe figury oznaczone są liczbami dodatnimi, czarne - ujemnymi. Zmianę układu na szachownicy można opisać przez słowny opis w rodzaju „pionek hetmański na linię cztery” albo przez wyrażenie $e_2 - e_4$. Przejścia kwantowe są opisywane za pomocą podobnej notacji uwzględniającej dwa stany (początkowy i końcowy). Żaden z opisów nie zawiera informacji o tym, w jaki sposób dokonuje się sam akt przejścia, czego najlepszą ilustracją jest roszada lub ruch konika szachowego. Naciągając nieco analogię z szachami, możemy sobie wyobrazić najmniejszą możliwą zmianę układu, $e_2 - e_3$, jako pochłonięcie kwantu energii $h \nu$, podczas gdy „przejście” odwrotne, $e_3 - e_2$, odpowiadałoby uwolnieniu kwantu o tej samej ilości energii. Analogia nie jest zbyt ścisła, ale dobrze ilustruje fakt, że różne formy notacji mogą opisywać to samo zdarzenie. Heisenberg, Dirac i Schrödinger znaleźli różne formy matematycznego opisu tych samych zjawisk kwantowych

Matematyka kwantowa

W lecie 1925 roku, pracując z Pascuałem Jordanem, Bom sformułował podstawy teorii, znanej obecnie pod nazwą mechaniki macierzowej. Gdy Heisenberg wrócił we wrześniu do Kopenhagi, korespondencyjnie dołączył do współpracy i wspólnie stworzyli szczegółową publikację naukową o mechanice kwantowej. Podkreślili, przejrzystej i bardziej jednoznacznie niż w pierwotnej publikacji Heisenberga, fundamentalne znaczenie niekomutowalności zmiennych kwantowych. Już w publikacji z Jordanem Bom odkrył zależność $pq * qp = \hbar/i$, gdzie p i q są macierzami reprezentującymi zmienne kwantowe, odpowiednikami pędu i położenia w świecie kwantów. W tych równaniach pojawia się stała Plancka oraz i , pierwiastek kwadratowy z liczby minus jeden. W publikacji zwanej „pracą trzech”⁴¹ zespół z Getyngi zwrócił uwagę, że jest to „fundamentalna relacja kwantowo-mechaniczna”. Co to oznaczało w kategoriach fizycznych? Stała Plancka była już dość powszechnie znana, równania zawierające i również były fizykom znane (gdyby tylko zdali sobie sprawę, że to był klucz do dalszych odkryć, gdyż równania te na ogół opisują drgania bądź fale). Jednak macierze były całkowicie nieznane większości matematyków i fizyków w 1925 roku, a

⁴¹ Ang.: *three-man-paper* (przyp. tłum.). W. Heisenberg, *Physics and Philosophy*, s. 41.

niekomutatywność wydawała im się na pierwszy rzut oka równie dziwna jak stała Plancka h ich poprzednikom w roku 1900. Dla tych, którzy potrafili przegryźć się przez matematykę, wyniki miały przełomowe znaczenie. Równania mechaniki Newtona zostały zastąpione przez podobne równania oparte na macierzach i, jak powiedział Heisenberg: „To było dziwne uczucie, gdy okazało się, że wiele spośród starych wyników mechaniki Newtona, jak zasada zachowania energii itp., można wyprowadzić także w nowym systemie”⁴². Innymi słowy, mechanika macierzowa zawiera mechanikę Newtona, podobnie jak relatywistyczne równania Einsteina zawierają równania Newtona jako szczególny przypadek. Niestety niewielu rozumiało matematyczną wersję nowej mechaniki i do większości fizyków nie od razu dotarło znaczenie przełomu dokonanego przez Heisenberga i grupę z Getyngi. Z jednym wyjątkiem.

Urodzony 8 sierpnia 1902 roku Paul Dirac był o kilka miesięcy młodszy od Heisenberga. Jest on powszechnie uważany za jedyne angielskiego teoretyka dorównującego rangą Newtonowi. Jego dziełem jest najbardziej kompletna wersja teorii zwanej obecnie mechaniką kwantową, mimo że zainteresował się teoretyczną fizyką dopiero po ukończeniu studiów inżynierskich na uniwersytecie w Bristolu w 1921 roku. Nie mogąc znaleźć posady jako inżynier, najpierw próbował wykorzystać stypendium na studia matematyczne w Cambridge, ale musiał zrezygnować z powodu braku pieniędzy. Mieszkając z rodzicami w Bristolu, w ciągu dwóch lat ukończył trzyletni kurs matematyki stosowanej. Teraz mógł w końcu udać się do Cambridge. Otrzymał dofinansowanie od Departamentu Badań Naukowych i Przemysłowych⁴³ na prowadzenie badań naukowych i dopiero po przybyciu do Cambridge po raz pierwszy usłyszał o teorii kwantowej.

Jako nieznany i niedoświadczony student Dirac zetknął się z Heisenbergiem w czasie jego wykładów w Cambridge w lipcu 1925 roku. Heisenberg wprawdzie nie mówił na wykładach o swoich najnowszych pracach, ale wspominał o nich Ralphowi Fowlerowi, który był promotorem Diraca, i wysłał mu kopię przyjętej do „Zeitschrift” publikacji, zanim ukazała się w druku. Fowler przekazał pracę Diracowi, który dzięki temu mógł się z nią zapoznać, zanim ktokolwiek poza Getyngą (z wyjątkiem Pauliego) miał szansę przestudiować nową teorię. W pierwszej publikacji Heisenberg zwrócił wprawdzie uwagę na niekomutatywność zmiennych mechaniki kwantowej - macierzy, ale nie rozwinął dalej tej idei, próbował tylko prowizorycznie dopasować ją do całości. Gdy Dirac przebrnął przez równania, natychmiast docenił fundamentalne znaczenie prostego faktu, że $a \times b \neq b \times a$. W odróżnieniu od Heisenberga Dirac poznał uprzednio obiekty matematyczne zachowujące się w ten sposób, dzięki czemu w ciągu kilku tygodni mógł doprowadzić równania Heisenberga do postaci, którą odkrył sto lat wcześniej William Hamilton i rozwinął na użytek obliczeń orbit w układach, w których, podobnie jak w Układzie Słonecznym, istnieje wiele wzajemnie oddziałujących planet. Do wielkich paradoksów nauki należy fakt, że równania Hamiltona okazały się użyteczne w nowej teorii kwantowej, która całkowicie odrzuciła koncepcję orbit elektronowych.

⁴² W. Heisenberg, *Physics and Philosophy*, s. 41.

⁴³ Ang.: Department of Scientific and Industrial Research (przyp. tłum.).

Tak więc Dirac odkrył, niezależnie od grupy z Getyngi, że równania mechaniki kwantowej mają tę samą strukturę matematyczną co równania mechaniki klasycznej, jak również, że mechanika klasyczna jest specjalnym przypadkiem mechaniki kwantowej, który odpowiada dużym wartościom liczb kwantowych (co jest równoważne ze sprowadzeniem stałej Plancka do zera). Kierując się własną intuicją, Dirac opracował jeszcze jeden sposób matematycznego opisu dynamiki, używając szczególnej formy algebry, którą nazwał algebrą kwantową. W tym ujęciu pojawiają się operacje dodawania i mnożenia zmiennych kwantowych „liczb q ”⁴⁴ - tworów dosyć dziwacznych, nie tylko dlatego, że w matematycznym świecie stworzonym przez Diraca nie da się określić, która z dwóch „liczb q ”, a czy b , jest większa - pojęcie liczb większych lub mniejszych w tej algebrze nie istnieje. Pomimo to, a może dlatego reguły tego matematycznego systemu dokładnie zgadzają się z obserwowanymi własnościami zjawisk atomowych. W rzeczy samej można powiedzieć, że algebra kwantowa zawiera mechanikę macierzową, ale osiąga znacznie więcej.

Fowler natychmiast zdał sobie sprawę ze znaczenia pracy Diraca, która dzięki jego rekomendacji została opublikowana w „Proceedings of the Royal Society” w grudniu 1925 roku. Publikacja zawierała także jako zasadniczy element nowej teorii połówkowe liczby kwantowe, nad którymi Heisenberg trzymał się kilka lat wcześniej. Otrzymałszy kopię pracy od Diraca, Heisenberg nie szczędził pochwał: „Przeczytałem Pańską niezwykle piękną pracę o mechanice kwantowej z wielkim zainteresowaniem; nie ulega wątpliwości, że wszystkie Pańskie wyniki są poprawne... [praca jest] rzeczywiście lepiej napisana i lepiej sformułowana niż nasze tutejsze wysiłki”⁴⁵. W pierwszej połowie 1926 roku Dirac kontynuował pracę, pisząc serię czterech rozstrzygających publikacji. Całość przyniosła mu całkowicie zasłużony doktorat. W tym czasie Pauli wykorzystał metody macierzowe i trafnie przewidział serię Balmera dla atomu wodoru. Pod koniec 1925 roku stało się jasne, że rozszczepienie niektórych linii widmowych na dublety może rzeczywiście być doskonale wytłumaczone przez przypisanie elektronowi nowej własności, zwanej spinem. Części łamigłówek zaczęły wreszcie dobrze pasować do siebie, a różne narzędzia matematyczne stosowane przez różnych wyznawców mechaniki macierzowej były ewidentnie różnymi aspektami tej samej rzeczywistości⁴⁶.

Pomocną analogią znów będzie gra w szachy. Istnieje wiele różnych sposobów opisanie przebiegu partii szachów. Jednym z nich jest wydruk szachownicy z naniesionymi pozycjami wszystkich figur. Jednak to zajęłoby wiele miejsca, gdybyśmy chcieli zapisać całą partię. Innym sposobem jest słowny opis wszystkich ruchów, np. „pionek królewski na czwarte pole pionka królewskiego”, a w najbardziej zwartej notacji algebraicznej ten sam ruch staje się po prostu: $d2-d4$. Trzy różne opisy dają tę samą informację o rzeczywistym zdarzeniu, przejściu pionka z jednego „stanu” do innego (i, podobnie jak w świecie kwantów, nic nie wiemy o tym, w jaki sposób

⁴⁴ Od ang.: *quatum* - kwant (przyp. tłum.).

⁴⁵ J. Mehra, H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory*, t. 4, s. 159.

⁴⁶ W wersji Diraca kluczowy element równań Hamiltona zostaje zastąpiony przez kwantowo-mechaniczne wyrażenie $(ab - ba)/\hbar$, które tylko formą różni się od wyrażenia użytego przez Borna, Heisenberga i Jordana, a nazwanego przez nich podstawową relacją kwantowo-mechaniczną w ich „pracy trzech”, napisanej przed ukazaniem się pierwszej publikacji Diraca o mechanice kwantowej, ale opublikowanej już po niej.

pionek dostał się z jednego stanu do drugiego, co jest jeszcze bardziej widoczne, gdy się rozważy ruchy konika). Podobnie można spojrzeć na różne sformułowania mechaniki kwantowej. Kwantowa algebra Diraca jest najbardziej elegancka i „piękna” w sensie matematycznym; metody macierzowe stworzone przez Borna i jego współpracowników na podstawie prac Heisenberga są mniej zgrabne, ale nie mniej skuteczne⁴⁷.

Do najważniejszych pierwszych wyników Diraca należą te, które pojawiły się, gdy spróbował włączyć do mechaniki kwantowej szczególną teorię względności. Opierając się na koncepcji światła jako cząstki (fotonu), Dirac wpadł w zachwyt, gdy odkrył, że potraktowanie czasu jako liczby q , na równi z innymi zmiennymi w jego równaniach, nieuchronnie prowadzi do „przewidywania”, że atom musi podlegać odrzutowi, gdy emituje światło, dokładnie tak, jakby światło było cząstką obdarzoną własnym pędem. Wykorzystując to spostrzeżenie, Dirac sformułował kwantowo-mechaniczną interpretację efektu Comptona. Obliczenia Diraca były prowadzone w dwóch etapach: najpierw manipulacje numeryczne na liczbach q , a potem interpretacja równań w celu określenia fizycznie obserwowalnych efektów. Ten stopniowy proces wydaje się dokładnie odpowiadać metodzie, którą stosuje natura: najpierw „wykonuje obliczenia”, których skutki widzimy w postaci zjawiska fizycznego, na przykład przejścia elektronowego. Niestety, w latach po 1926 roku fizycy porzucili dalsze rozwijanie algebry kwantowej, oczarowani nowo odkrytą jeszcze jedną techniką matematyczną, która pomogła rozwiązać długotrwałe problemy teorii kwantowej, a mianowicie mechaniką falową. Mechanika macierzowa, jak również algebra kwantowa, zaczęła się od modelu, w którym elektron jest cząstką przenoszącą się z jednego stanu kwantowego do innego. Co jednak z sugestią de Broglie'a, że elektrony, a także inne cząstki należy również traktować jako fale?

Teoria Schrödingera

Kiedy mechanika macierzowa i algebra kwantowa bez większego rozgłosu debiutowały na naukowej scenie, w teorii kwantowej zdarzyło się wiele innych interesujących rzeczy. Wydaje się, że zamieszanie w europejskiej nauce osiągnęło punkt kulminacyjny. Różne pomysły pojawiały się w różnych miejscach, niekoniecznie w takiej kolejności, która teraz wydaje się logiczna, wiele z nich „odkryli” różni ludzie w tym samym czasie. Pod koniec 1925 roku pojawiła się teoria de Broglie'a o fali elektronowej, ale eksperymenty, które definitywnie potwierdziły jej słuszność, jeszcze nie zostały przeprowadzone. Zupełnie niezależnie od prac Heisenberga i jego kolegów doszło do odkrycia jeszcze jednej matematyki kwantowej - opartej na koncepcji falowej.

Pomysł przyszedł od de Broglie'a, ale być może przez wiele jeszcze lat byłby uważany za nie więcej niż interesujący matematyczny chwyt pozbawiony fizycznego znaczenia, gdyby nie zwrócił

⁴⁷ Z charakterystyczną i autentyczną skromnością Dirac opisuje, jak łatwo jest czynić postępy, już wiedząc, że poprawne równania kwantowe powstają przez przekształcenie równań klasycznych do formy hamiltonowskiej. Aby rozwiązać którąś z licznych zagadek, które trapiły teorię kwantową, wystarczyło sformułować odpowiednie równanie klasyczne, przekształcić je w hamiltonian i rozwiązać. „To była gra, bardzo interesująca gra. Gdy ktoś rozwiązał którąkolwiek z małych zagadek, natychmiast mógł pisać o tym pracę. W tych czasach drugorzędny fizyk mógł łatwo robić pierwszorzędną fizykę. Od tamtych czasów nie było już więcej takiej hossy. Dzisiaj jest bardzo trudno pierwszorzędnemu fizykowi robić drugorzędną fizykę” (P. Dirac, *Directions in Physics*, s. 7).

uwagi Einsteina. To Einstein, wspomniawszy o tym Bomi, uruchomił ciąg prac eksperymentalnych, które wykazały realność fal elektronowych. To właśnie w jednej z publikacji Einsteina Erwin Schrödinger przeczytał uwagę o pracach de Broglie'a: „Uważam, że w grę wchodzi coś więcej niż zwykła analogia”. W tych czasach fizycy chłonili każde słowo Einsteina. Jedno skinienie z jego strony wystarczyło Schrödingerowi, żeby zająć się zbadaniem, jakie byłyby konsekwencje potraktowania dosłownie sugestii de Broglie'a.

Schrödinger jest wyjątkową postacią wśród fizyków, którzy stworzyli nową teorię kwantową. Urodził się w 1887 roku, a w momencie dokonania swego największego odkrycia miał trzydzieści dziewięć lat, czyli dość zaawansowany wiek jak na pracę naukową tej rangi. Doktorat otrzymał w 1910 roku, a od 1921 był profesorem fizyki w Zurychu, wzorem naukowej powagi, jednym słowem - mało prawdopodobnym źródłem rewolucyjnie nowych idei. Wszakże, jak się przekonamy, jego wkład do teorii kwantowej był w dużym stopniu właśnie taki, jakiego można by się w połowie lat dwudziestych spodziewać po przedstawicielu starszego pokolenia. Podczas gdy grupa z Getyngi, a Dirac w jeszcze większym stopniu, uczyniła z teorii kwantowej raczej abstrakcyjną naukę i oderwała ją od idei klasycznej fizyki, Schrödinger próbował przywrócić zrozumiałe pojęcia fizyczne za pomocą opisu zjawisk kwantowych w kategoriach falowych i do końca swego życia był przeciwnikiem zasady nieoznaczoności i natychmiastowych przeskoków elektronów z jednego stanu do drugiego. Dał fizyce bezcenne narzędzie do rozwiązywania praktycznych problemów, ale w kategoriach poznawczych jego mechanika falowa była krokiem wstecz, powrotem do idei dziewiętnastowiecznych.

De Broglie w swojej teorii pokazał, w jaki sposób elektrony „na orbicie” wokół jądra atomowego muszą zmieścić całkowitą liczbę długości fali na każdej orbicie, przez co pośrednie orbity są „zabronione”. Schrödinger wykorzystał matematykę ruchu falowego do obliczenia energii dozwolonych poziomów i w pierwszej chwili, ku swemu rozczarowaniu, otrzymał wyniki niezgodne ze znanymi własnościami widm atomowych. W istocie w jego rachunkach nie było błędów, a jedynym powodem jego początkowej porażki było nieuwzględnienie spinu elektronu, co nie jest niczym dziwnym, zważywszy, że w tym czasie (w 1925 roku) koncepcja spinu jeszcze się nie pojawiła. Zniechęcony Schrödinger na kilka miesięcy odłożył pracę, co pozbawiło go palmy pierwszeństwa w opublikowaniu kompletnej, logicznej i spójnej teorii kwantów. Powrócił do swego pomysłu, gdy przygotowując się do kolokwium na temat pracy de Broglie'a, odkrył, że jeżeli pominie w swoich obliczeniach efekty relatywistyczne, to uzyska dobrą zgodność z danymi doświadczalnymi w sytuacjach, gdzie te efekty są nieistotne. Dirac wykazał później, że spin elektronu jest zasadniczo własnością relatywistyczną (i nie ma nic wspólnego z wirowaniem obiektów wokół własnej osi, znanym z codziennego życia). Tak więc wielkie odkrycie Schrödingera zostało opublikowane w serii publikacji w 1926 roku, wkrótce po pracach Heisenberga, Borna, Jordana i Diraca.

Równania teorii kwantowej w wersji Schrödingera należą do tej samej rodziny równań, które opisują realne fale w codziennym życiu - fale na powierzchni oceanu albo fale niosące dźwięk przez atmosferę.

Świat fizyki przyjął je z entuzjazmem właśnie dlatego, że wydawały się takie swojskie. Trudno byłoby sobie wyobrazić bardziej różniące się od siebie podejścia do problemu kwantów. Heisenberg celowo odrzucił jakikolwiek obraz atomu i zajmował się tylko wielkościami, które można zmierzyć poprzez doświadczenie; idea elektronów jako cząstek była w jego teorii zasadnicza. Schrödinger zaczął od sprecyzowanego fizycznego obrazu atomu jako „realnego” bytu; podstawowa w jego teorii była idea elektronów jako fal. Oba modele dały zestawy równań dokładnie opisujące zachowanie i własności obiektów kwantowych, które można zmierzyć doświadczalnie.

Na pierwszy rzut oka było to zaskakujące, ale Schrödinger i amerykański fizyk Carl Eckart, a wkrótce potem Dirac, bardzo szybko udowodnili, że te różne zestawy równań były matematycznie równoważne i stanowiły inne ujęcie tych samych struktur matematycznych. Równania Schrödingera zawierają zarówno relacje niekomutatywności, jak i decydujący czynnik \hbar/i , zasadniczo w taki sam sposób, w jaki pojawiają się one w mechanice macierzowej i w algebrze kwantowej. Odkrycie, że te różne podejścia do problemu są w istocie matematycznie równoważne, wzmocniło zaufanie fizyków do wszystkich trzech modeli. Wydaje się, że niezależnie od zastosowanego formalizmu matematycznego, gdy przystępujemy do rozwiązywania podstawowych problemów teorii kwantowej, uzyskujemy te same „odpowiedzi”. Wersja Diraca jest najpełniejsza, gdyż jego algebra kwantowa zawiera zarówno mechanikę macierzową, jak i falową jako szczególne przypadki. Jednakże fizycy lat dwudziestych wybrali najprostsza wersję - wersję Schrödingera, którą najłatwiej zrozumieć w kategoriach codziennego życia, gdyż jej równania były znane z wielu dziedzin fizyki klasycznej (optyki, hydrodynamiki i innych). Wybór ten wydaje się dosyć naturalny, aczkolwiek sukcesowi wersji Schrödingera można prawdopodobnie przypisać zastój w zrozumieniu świata kwantów, który nastąpił w ciągu kilku następnych dziesięcioleci.

Krok wstecz

Z perspektywy czasu wydaje się dziwne, że Dirac nie odkrył (czy wynalazł) mechaniki falowej, gdyż te same równania Hamiltona, które okazały się tak użyteczne w mechanice kwantowej, miały swój początek w dziewiętnastowiecznych próbach unifikacji falowej i cząstkowej teorii światła. Urodzony w 1805 roku w Dublinie sir William Hamilton jest dosyć powszechnie uważany za najwybitniejszego matematyka swoich czasów. Jego największym osiągnięciem (aczkolwiek ówczasie mniej docenianym) była unifikacja praw optyki i dynamiki w jedną matematyczną strukturę - jeden zestaw równań, który może być użyty do opisu ruchu zarówno fali, jak i cząstki. Jego prace ukazały się na przełomie lat dwudziestych i trzydziestych dziewiętnastego wieku i oba te aspekty znalazły naśladowców. Zarówno mechanika, jak i optyka były bardzo użyteczne dla badaczy w drugiej połowie dziewiętnastego wieku, ale prawie nikt nie zauważył połączonego systemu mechaniczno-optycznego, który był prawdziwym przedmiotem zainteresowania

Hamiltona. Z prac Hamiltona wynika jednoznaczny wniosek, że podobnie jak w optyce „promienie” światła muszą zostać zastąpione przez pojęcie światła, tak w mechanice tory cząstek muszą ustąpić ruchowi falowemu. Jednak tego rodzaju pomysł był dziewiętnastowiecznej fizyce tak obcy, że nikt - łącznie z Hamiltonem - nie sformułował go w tej postaci. Rzecz nie w tym, że pomysł został zaproponowany i odrzucony jako absurd; był po prostu tak dziwaczny, że nikomu nawet nie przyszedł do głowy. Było rzeczą niemożliwą, aby tego rodzaju wniosek mógł sformułować którykolwiek z fizyków w dziewiętnastym wieku - zanim zostało udowodnione, że mechanika klasyczna jest nieadekwatna do opisu procesów atomowych. Jednak w świetle faktu, że Hamilton także stworzył dziedzinę matematyki, w której $a \times b \neq b \times a$, nie będzie przesadą nazwanie go zapoznanym współtwórcą mechaniki kwantowej. Gdyby był na świecie w czasach zaistnienia teorii kwantowej, z pewnością szybko odkryłby związek między wersją macierzową i falową. Dirac także miał szansę być pierwszy, ale nie należy się dziwić, że początkowo nie zauważył tego związku. W końcu wciąż był studentem głęboko zaangażowanym w swoją pierwszą pracę naukową. Poza tym istnieją granice tego, co jeden człowiek może dokonać w ciągu kilku tygodni. Być może jeszcze ważniejszy był fakt, że miał do czynienia z abstrakcyjnymi ideami, kontynuując wysiłki Heisenberga, aby oderwać fizykę kwantową od wygodnego obrazu elektronów orbitujących wokół jądra atomowego, i nie spodziewał się, że mógłby znaleźć prosty i zrozumiały model atomu. Z początku nikt nie zauważył, że mechanika falowa, wbrew oczekiwaniom Schrödingera, bynajmniej nie jest takim intuicyjnie prostym modelem. Schrödinger sądził, że wprowadzając ruch falowy do atomu, pozbył się skoków kwantowych z jednego stanu do innego i przypuszczał, że „przejścia” elektronu od jednej energii do innej polegają na czymś w rodzaju zmiany drgań struny skrzypiec od jednego tonu do innego (od jednej harmoniczej do innej). Fala w jego równaniu falowym byłaby falą de Broglie'a. Jednak w miarę jak próbowano zrozumieć i zinterpretować znaczenie pojęć leżących u podstaw równania Schrödingera, nadzieje na renesans fizyki klasycznej powoli się rozwiewały. Koncepcja falowa zupełnie zbiła Bohra z tropu. W jaki sposób fala albo zbiór oddziałujących ze sobą fal mógłby zostać zarejestrowany przez licznik Geigera tak, jakby zarejestrował on pojedynczą cząstkę? Co właściwie „faluje” w atomie? I najważniejsze - w jaki sposób wytłumaczyć charakter promieniowania ciała doskonale czarnego w kategoriach fal Schrödingera? Bohr zaprosił więc Schrödingera w 1926 roku do Kopenhagi, gdzie wspólnie przeanalizowali te problemy i doszli do wniosków, które Schrödingera bynajmniej nie zachwyciły.

Po pierwsze, po dokładniejszej analizie fale okazały się równie abstrakcyjne jak liczby q Diraca. Z analizy matematycznej wynika, że nie mogą one być prawdziwymi falami w przestrzeni jak zmarszczki na powierzchni jeziora, lecz dość skomplikowaną formą drgań w wymyślonej przestrzeni matematycznej zwanej przestrzenią konfiguracyjną. Co gorsza, każda cząstka (powiedzmy, każdy elektron) potrzebuje swoich własnych trzech wymiarów. Jeden elektron sam w sobie może być opisany przez równanie falowe w trójwymiarowej przestrzeni konfiguracyjnej; do opisu dwóch elektronów potrzeba sześciowymiarowej przestrzeni; trzy elektrony wymagają dziewięciu wymiarów i tak dalej. Nawet gdy wszystko zostało przetransponowane na język

mechaniki falowej, kwanty i skoki kwantowe nadal były konieczne do opisu promieniowania ciała doskonale czarnego. Rozgoryczony Schrödinger wypowiedział uwagę, która jest często cytowana, z drobnymi zmianami zależnymi od tłumaczenia: „Gdybym wiedział, że nie pozbedziemy się tych przeklętych skoków kwantowych, nigdy bym się nie wziął za ten interes”. Heisenberg w swojej książce *Physics and Philosophy* tak określił ówczesny punkt widzenia: „Paradoksy dualizmu modelu falowego i modelu cząstkowego nie zostały rozwiązane, lecz jedynie w pewien sposób ukryte w matematycznym formalizmie”.

Pociągający obraz fizycznie realnych fal obiegających jądra atomowe, który doprowadził Schrödingera do odkrycia równania falowego noszącego obecnie jego imię, jest bez wątpienia błędny. Mechanika falowa w nie większym stopniu niż mechanika macierzowa dowodzi realności świata atomów, ale w odróżnieniu od mechaniki macierzowej mechanika falowa stwarza iluzję czegoś swojskiego. Ta sympatyczna iluzja przetrwała do dzisiaj i przesłoniła fakt, że świat atomów jest zupełnie inny niż świat, którego doświadczamy zmysłami. Kilka pokoleń studentów, którzy w międzyczasie wyrosli na profesorów, mogłoby osiągnąć głębsze zrozumienie teorii kwantowej, gdyby zostali zmuszeni do zmierzenia się z abstrakcyjną naturą wersji Diraca i nie wyobrażali sobie, że to, co wiedzą o zachowaniu fal w codziennym świecie, daje obraz zachowania atomów. Dlatego wydaje mi się, że pomimo olbrzymich sukcesów mechaniki kwantowej w rozwiązywaniu wielu interesujących problemów (pamiętamy uwagę Diraca o drugorzędnych fizykach robiących pierwszorzędną fizykę) jesteśmy dzisiaj, po ponad pięćdziesięciu latach, w niewiele lepszej sytuacji niż fizycy lat dwudziestych, jeśli chodzi o zrozumienie podstaw mechaniki kwantowej. Sukces równania Schrödingera jako praktycznego narzędzia odciągnął uwagę od pytania, dlaczego narzędzie to działa.

Kwantowa książka kucharska

Podstawowe przepisy z kwantowej książki kucharskiej - praktyczna fizyka kwantowa - opierają się na koncepcjach sformułowanych przez Bohra i Borna pod koniec lat dwudziestych. Bohr dał nam bazę filozoficzną, za pomocą której pogodził ze sobą dualną, cząstkowo-falową naturę świata kwantów, a Born stworzył podstawowe reguły przygotowywania kwantowych przepisów kucharskich.

Bohr powiedział, że o b a modele teoretyczne, cząstkowy i falowy, są równie uprawnionymi i komplementarnymi opisami tej samej rzeczywistości. Żaden opis nie jest sam w sobie kompletny - w pewnych sytuacjach bardziej odpowiednia jest koncepcja cząstkowa, a w innych lepiej jest użyć koncepcji falowej. Fundamentalne byty kwantowe, na przykład elektron, nie są ani cząstkami, ani falami, lecz w pewnych sytuacjach zachowują się jakby były cząstkami, a w innych jakby były falami (w rzeczywistości są to oczywiście jaszmyje smukwijne). Jednak w żadnych okolicznościach nie da się wymyślić eksperymentu, w którym elektron zachowywałby się równocześnie jak cząstka i jak fala⁴⁸.

⁴⁸ To oczywiście zależy od tego, jak się rozumie pojęcie równoczesności. W doświadczeniu z dwiema szczelinami elektron zachowuje się jak fala w momencie przechodzenia przez szczeliny, a następnie - gdy pada na ekran - jak cząstka (przyp. tłum.).

Ta koncepcja fali i cząstki jako dwóch uzupełniających się aspektów skomplikowanej natury elektronu jest określana jako komplementarność.

Born znalazł nowy sposób interpretowania fal Schrödingera. W równaniu Schrödingera występuje funkcja falowa - interesujący twór odpowiadający zmarszczkom na powierzchni jeziora w realnym świecie, zwykle oznaczany grecką literą Ψ . Pracując w Getyndze u boku fizyków doświadczalnych, niemal codziennie stykał się z wynikami eksperymentów potwierdzających cząstkową naturę elektronu i w żaden sposób nie mógł zaakceptować faktu, że funkcja Ψ reprezentuje „realną” falę elektronową, aczkolwiek podobnie jak niemal wszyscy ówcześni (a także późniejsi) fizycy zaakceptował równanie falowe jako najlepsze narzędzie do rozwiązywania realnych problemów fizyki kwantowej. Próbując znaleźć sposób na powiązanie funkcji falowej z istnieniem cząstek, podchwycił i zmodyfikował pomysł, który pojawił się już wcześniej, przy okazji dyskusji o naturze światła. W jego interpretacji cząstki są realne, ale w pewnym sensie są sterowane przez falę, której natężenie (ściślej - wartość Ψ^2)⁴⁹ w każdym punkcie przestrzeni jest miarą prawdopodobieństwa znalezienia cząstki w tym punkcie. Nigdy nie wiemy na pewno, gdzie elektron się znajduje, ale funkcja falowa pozwala nam obliczyć prawdopodobieństwo znalezienia go w określonym miejscu w eksperymencie. Najdziwniejsze w tej teorii jest to, że według niej każdy elektron może być w każdym miejscu w przestrzeni, lecz szanse znalezienia go w niektórych miejscach są bardzo duże, a w innych bardzo małe. Tak jak prawa statystyki mówią, że jest możliwe, aby w pewnej chwili całe powietrze w tym pomieszczeniu znalazło się w jednym kącie, tak samo interpretacja Borna wprowadziła trochę niepewności do i tak niepewnego świata kwantów.

Pomysły Bohra i Borna świetnie się uzupełniły z odkryciem Heisenberga, pod koniec 1926 roku, że nieoznaczoność rzeczywiście jest nieuniknioną właściwością równań mechaniki kwantowej. Matematyka, z której wynika $pq \neq qp$, mówi nam także, że nigdy nie możemy być pewni, ile p lub q wynosi. Jeżeli dla pędu elektronu użyjemy symbolu p , a dla jego położenia symbolu q , to możemy wyobrazić sobie pomiar p albo q z bardzo dużą dokładnością. Miarę „niedokładności” naszego pomiaru oznaczmy Δp i Δq , gdyż matematycy używają greckiej litery Δ do oznaczania małych wartości albo odchyłeń. Heisenberg pokazał, że jeśli się próbuje wyznaczyć równocześnie położenie i pęd elektronu, to nigdy się nie uzyska absolutnie dokładnego wyniku, gdyż $\Delta p \Delta q$ musi zawsze być większe niż \hbar , stała Plancka podzielona przez 2π . Im dokładniej znamy położenie jakiegoś obiektu, tym mniej pewni jesteśmy co do jego pędu - dokąd i jak szybko się porusza. Z kolei gdy znamy bardzo dokładnie jego pęd, nie możemy określić, gdzie dany obiekt się znajduje. Ta zasada nieoznaczoności ma daleko idące konsekwencje, które szczegółowo omówimy w trzeciej części tej książki. Ważne jest jednak, aby zdawać sobie sprawę, że zasada nie dotyczy niedoskonałości samych eksperymentów, w których dokonuje się pomiaru (np. pędu i położenia

⁴⁹ Jeszcze ściślej - wartość $|\Psi|^2$, gdyż wartościami funkcji Ψ są liczby zespolone (jedną z takich liczb jest wspomniana na s. 23 liczba i), a miara prawdopodobieństwa musi być liczbą rzeczywistą (przyp. tłum.).

elektronu). Kardynalna zasada mechaniki kwantowej mówi, że niemożliwy jest równoczesny i dokładny pomiar pewnych par wielkości fizycznych, m.in. położenia i pędu⁵⁰.

Relacja nieoznaczoności Heisenberga mierzy, w jakim stopniu nakładają się na siebie dwa komplementarne opisy elektronu (i innych kwantowych bytów). Położenie jest w istocie atrybutem cząstki (cząstki można dokładnie zlokalizować). Z drugiej strony fale nie mają dobrze określonego położenia, ale mają pęd. Im więcej wiemy o falowym aspekcie rzeczywistości, tym mniej wiemy o cząstce, i vice versa. Eksperymenty zaprojektowane do wykrycia cząstek zawsze wykrywają cząstki; eksperymenty zaprojektowane do wykrycia fal zawsze wykrywają fale. Żaden eksperyment nie pokaże elektronu zachowującego się jak fala i jak cząstka równocześnie.

Bohr kładł szczególny nacisk na znaczenie eksperymentów w naszym pojmowaniu świata kwantów. Jedyne sposoby na badanie tego świata polega na wykonywaniu eksperymentów, a każdy eksperyment jest w istocie pytaniem dotyczącym kwantowych praw przyrody. Pytania, które zadajemy, są w znacznym stopniu inspirowane naszym codziennym doświadczeniem, więc szukamy własności w rodzaju pędu, albo długości fali, a otrzymane odpowiedzi interpretujemy w kategoriach tych samych własności. Eksperymenty są głęboko zakorzenione w klasycznej fizyce, mimo że zdajemy sobie sprawę, iż klasyczna fizyka nie nadaje się do opisu procesów atomowych. Na dodatek, jak mówi Bohr, aby obserwować zjawiska atomowe, musimy je zaburzać, gdyż nie ma sensu pytanie, co atomy robią, gdy na nie nie patrzymy. Wszystko, co zdaniem Bohra możemy uczynić, to obliczyć prawdopodobieństwo, że wynik danego eksperymentu będzie taki a nie inny.

Ten zestaw pojęć (nieoznaczoność, komplementarność, prawdopodobieństwo i zaburzenie obserwowanego układu przez obserwatora) noszą wspólne miano kopenhaskiej interpretacji mechaniki kwantowej, aczkolwiek nikt w Kopenhadze (ani gdziekolwiek indziej) nigdy nie spisał deklaracji programowej nazwanej interpretacją kopenhaską, a jeden z jej głównych składników - statystyczna interpretacja funkcji falowej - pochodzi z Getyngi, od Maxa Borna. Interpretacja kopenhaska jest przez różnych ludzi różnie rozumiana (niekiedy tak bardzo różnie, że przestaje cokolwiek znaczyć) i jest równie nieuchwytna jak kwantowe jasmije smukwijnie. Bohr po raz pierwszy publicznie przedstawił tę koncepcję na konferencji w Como, we Włoszech, we wrześniu 1927 roku, co oznaczało zamknięcie etapu konstruowania mechaniki kwantowej w formie kompletnej i spójnej teorii, która może być użyta przez każdego kompetentnego fizyka do rozwiązywania problemów fizycznych obejmujących atomy i molekuly przez proste zastosowanie przepisów z książki kucharskiej, bez konieczności rozważania podstaw teorii.

W kolejnych dziesięcioleciach pojawiło się wiele fundamentalnych prac Diraca, Pauliego i innych, a pionierzy nowej teorii kwantowej zostali odpowiednio uhonorowani przez Komitet Noblowski, który zresztą przy podziale nagród kierował się swoją własną, osobliwą logiką.

⁵⁰ Ta sama zasada stosuje się w życiu codziennym, ale nieoznaczoność pomiaru stanowi mikroskopijny ułamek mierzonych wielkości makroskopowej ze względu na to, że p i q są o wiele większe niż \hbar . Stała Plancka h wynosi około $6,6 \times 10^{-27}$, π jest trochę większe niż trzy, więc \hbar równe jest mniej więcej 10^{-27} . Możemy mierzyć położenie i pęd kuli bilardowej, obserwując tor jej ruchu na stole, ale w żaden praktyczny sposób nie wykryjemy kwantowo-mechanicznej nieoznaczoności, skoro jest ona porównywalna do czegoś tak małego jak 10^{-27} . Jak zawsze efekty kwantowe pojawiają się dopiero wtedy, gdy liczby w równaniach są mniej więcej tego rzędu (albo mniejsze) co stała Plancka.

Heisenberg otrzymał Nagrodę Nobla w 1932 roku, ale fakt, że pominięci zostali jego koledzy, Born i Jordan, wstrząsnął nim do głębi. Szczególnie dotknęło to Borna, który przez wiele lat z goryczą wspominał, że Heisenberg nie wiedział nawet, co to jest macierz, dopóki Born mu nie wyjaśnił. W 1953 roku napisał do Einsteina: „W owych czasach on nie miał pojęcia, co to jest macierz. Za naszą wspólną pracę to on zgarnął wszystkie nagrody, łącznie z Noblem”⁵¹. Schrödinger i Dirac podzielili się Nagrodą Nobla z fizyki w 1933 roku, Pauli musiał czekać aż do 1945 na swoją, przyznaną za odkrycie nazwanej jego imieniem zasady wykluczania, a Born został w końcu uhonorowany w 1954 roku za pracę o probabilistycznej interpretacji mechaniki kwantowej⁵².

Wszystkie te wydarzenia - nowe odkrycia lat trzydziestych, nagrody, nowe zastosowania teorii kwantowej w okresie po drugiej wojnie światowej - nie powinny przysłonić nam faktu, że era fundamentalnych odkryć skończyła się. Możliwe, że jesteśmy na granicy kolejnej takiej ery, w której postęp zacznie się od odrzucenia interpretacji kopenhaskiej i traktowanej jak dogmat funkcji falowej Schrödingera. Jednakże zanim omówimy te dramatyczne możliwości, warto odnotować, jak wiele udało się osiągnąć teorii, która swą kompletną formę zasadniczo uzyskała przed końcem lat dwudziestych.

Rozdział siódmy

Kuchnia kwantowa

Żeby używać przepisów z kwantowej książki kucharskiej, fizycy muszą wiedzieć kilka prostych, lecz podstawowych rzeczy. Nie ma modelu, który mówiłby, jak w rzeczywistości wyglądają atomy i cząstki elementarne i co się z nimi dzieje, gdy na nie nie patrzymy. Jednak z równań mechaniki falowej (najpopularniejszej i najczęściej stosowanej wersji teorii kwantowej) można otrzymać statystyczne przewidywania zachowań obiektów kwantowych. Jeśli w trakcie doświadczenia dla pewnej mierzony wielkości kwantowej otrzymujemy wartość A , to równania kwantowe mówią nam, jakie jest prawdopodobieństwo otrzymania wartości B (albo C , albo D , albo jakiegokolwiek innej), jeżeli wykonamy to doświadczenie ponownie. Teoria kwantowa *nie* mówi, jak atomy wyglądają ani też, co robią, gdy na nie nie patrzymy. Niestety, większość ludzi, którzy stosują dziś równania kwantowe, nie rozumie tego faktu i zbywa rolę prawdopodobieństwa frazesami. Studenci uczą się,

⁵¹ M. Born, *The Born-Einstein Letters*, s. 203.

⁵² Nierychliwie, według opinii samego zainteresowanego (aby oddać mu sprawiedliwość, należy dodać, że opinię tę podzielało wielu innych). W *The Born-Einstein Letters*, Born wspomina (s. 229): „Fakt, że nie dostałem Nagrody Nobla w 1932 roku, razem z Heisenbergiem, bardzo mnie wtedy zranił, pomimo uprzejmego listu od Heisenberga”. Jego zdaniem opóźnienie w uznaniu jego prac nad statystyczną interpretacją równania falowego było spowodowane opozycją wobec tej idei ze strony Einsteina, Schrödingera, Plancka i de Broglie'a - nazwisk tych Komitet Noblowski z pewnością nie mógł zlekceważyć. Wspominając „szkołę kopenhaską, która dzisiaj używa swej nazwy niemal wszędzie dla sposobu myślenia, który ja zapoczątkowałem”, odwołuje się do faktu, że interpretacja kopenhaska wchłonęła idee statystyczne. To nie jest bynajmniej zrzędzenie stetryczalego staruszka - Born miał wszelkie podstawy, aby domagać się uznania swoich zasług i wszyscy w kwantowo-mechanicznym świecie byli zachwyceni, gdy w końcu to się stało. Jednak nikt nie cieszył się bardziej niż Heisenberg, który później tak to skomentował w rozmowie z Jagdishem Mehra: „Odczułem tak wielką ulgę, gdy Born dostał Nagrodę Nobla” (J. Mehra, H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory*, t. 4, s. 281).

według określenia Teda Bastina, „skryształizowanej formy idei, których ewolucja zakończyła się w późnych latach dwudziestych... [uczą się tego] czego przeciętny fizyk, który nigdy nie zastanawia się nad fundamentalnymi kwestiami, może użyć w swojej pracy do rozwiązania swoich szczegółowych problemów”⁵³. Uczą się myśleć w kategoriach realnie istniejących fal i niewielu z nich wychodzi z wykładu z teorii kwantowej bez obrazu atomu w wyobraźni. Ludzie wykorzystują interpretację probabilistyczną, nie rozumiejąc jej właściwie i tylko dzięki potężnej mocy równań odkrytych przez Schrödingera i Diraca w szczególności, jak również interpretacji sformułowanej przez Borna, mogą pichcić według kwantowych przepisów, nawet nie znając zasad działania kuchni.

Pierwszym kwantowym kucharzem był Dirac. Był pierwszym fizykiem spoza Getyngi, który zrozumiał mechanikę macierzową i dalej ją rozwinął, a także stworzył trwałe fundamenty mechaniki falowej Schrödingera i również ją rozszerzył. Dodając czas jako czwarty wymiar i dostosowując mechanikę kwantową do wymogów teorii względności, Dirac odkrył w 1928 roku, że należy wprowadzić wielkość obecnie identyfikowaną ze spinem elektronu, niespodziewanie dostarczając wyjaśnienia dubletowego rozszczepienia linii widmowych, które przez całą dekadę sprawiało teoretykom kłopoty. W tej samej pracy pojawił się jeszcze jeden nieoczekiwany rezultat, który stworzył możliwości rozwoju współczesnej fizyki cząstek.

Antymateria

Zgodnie z równaniami Einsteina energia cząstki o masie m i pędzie p wynosi

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2,$$

co sprowadza się do znanego wzoru $E = mc^2$, gdy pęd jest równy zero. Jednak na tym się bynajmniej nie kończy, ponieważ wzór ten wynika z wyciągnięcia pierwiastka kwadratowego z pełnego równania, a w matematyce E może być zarówno dodatnie, jak i ujemne. Podobnie jak $2 \times 2 = 4$, również $(-2) \times (-2) = 4$, więc biorąc rzecz ściśle, $E = \pm mc^2$. Gdy takie „ujemne pierwiastki” pojawiają się wśród rozwiązań, często bywają odrzucane jako pozbawione fizycznego znaczenia, gdyż jest „oczywiste”, że jedynym interesującym rozwiązaniem jest to z dodatnim pierwiastkiem. Dirac, który był geniuszem, nie uczynił tego oczywistego kroku, lecz zastanowił się nad implikacjami. Gdy wyznaczamy poziomy energii w relatywistycznej wersji mechaniki kwantowej, pojawiają się dwa zestawy rozwiązań: jeden, z samymi dodatnimi rozwiązaniami odpowiadającymi mc^2 , i drugi, z samymi ujemnymi odpowiadającymi $-mc^2$. Elektrony powinny, zgodnie z teorią, znaleźć się w najniższym nie zajęтым stanie, a nawet najwyższy stan ujemny leży niżej niż najniższy stan dodatni. Co zatem znaczą ujemne stany energii i dlaczego wszystkie elektrony we wszechświecie nie spadły do nich i nie zniknęły?

Odpowiedź Diraca opiera się na fakcie, że elektrony są fermionami, co oznacza, że tylko jeden elektron może zająć dany stan kwantowy (dwa elektrony na każdym poziomie energii, każdy z innym spinem). Elektrony nie spadły do ujemnych stanów energii, ponieważ, zdaniem Diraca, wszystkie te stany są już zajęte. To, co nazywamy pustą przestrzenią, w rzeczywistości jest

⁵³ T. Bastin, *Quantum Theory and Beyond*, s. 1.

morzem elektronów o ujemnej energii! Dirac nie poprzestał na tej konkluzji. Jeśli dodamy elektronowi energii, to przemieści się w górę drabiny stanów energetycznych. Zatem jeśli dodamy dostatecznie dużo energii elektronowi z morza ujemnych wartości energii, to powinien on wyskoczyć do realnego świata i stać się widoczny jako zwykły elektron. Aby dostać się ze stanu $-mc^2$ do stanu $+mc^2$, potrzebuje on dawki energii wielkości $2mc^2$, co w przypadku elektronu wynosi około 1 MeV i może być całkiem łatwo uzyskane w procesach atomowych albo gdy cząstki zderzają się ze sobą. Elektron o ujemnej energii, który dostanie się do realnego świata, będzie pod każdym względem normalny, ale zostawi za sobą dziurę w morzu ujemnych energii w postaci braku ujemnie naładowanego elektronu. Taka dziura powinna, zdaniem Diraca, zachowywać się jak dodatnio naładowana cząstka (podobnie jak podwójna negacja staje się zdaniem twierdzącym, brak ujemnie naładowanej cząstki w ujemnym morzu powinien zmanifestować się jako ładunek dodatni). Gdy Dirac po raz pierwszy wpadł na ten pomysł, na podstawie symetrii całej sytuacji doszedł do wniosku, że ta dodatnio naładowana cząstka powinna mieć taką samą masę jak elektron. Jednak w chwili słabości, publikując tę teorię, zasugerował, że tą dodatnią cząstką mógłby być proton, jedyna oprócz elektronu cząstka znana pod koniec lat dwudziestych. Jak pisze w swoich *Directions in Physics*, mylił się i powinien był mieć odwagę, aby przewidzieć, że doświadczalnicy znajdą uprzednio nie znaną cząstkę z tą samą masą co elektron, ale z dodatnim ładunkiem.

Z początku nikt nie wiedział, jak należy rozumieć pracę Diraca. Pomysł, że dodatnim partnerem elektronu jest proton, został odrzucony i nikt nie traktował pomysłu Diraca zbyt poważnie, dopóki Carl Anderson, fizyk amerykański, w czasie swoich pionierskich obserwacji promieniowania kosmicznego w 1932 roku nie odkrył śladu dodatnio naładowanej cząstki. Promienie kosmiczne to obdarzone bardzo dużą energią cząstki, które przybywają na Ziemię z przestrzeni kosmicznej. Zostały one odkryte przed pierwszą wojną światową przez Austriaka, Victora Hessa, który za odkrycie to podzielił się w 1936 roku Nagrodą Nobla z Andersonem. Eksperymenty Andersona polegały na badaniu naładowanych cząstek w komorze mgłowej - urządzeniu, w którym cząstki zostawiają ślad podobny do smugi kondensacyjnej samolotu. Anderson odkrył cząstki, które w polu magnetycznym zostawiały podobny ślad jak elektron - zakrzywiony w takim samym stopniu, ale w przeciwnym kierunku. To mogły być tylko cząstki o takiej samej masie jak elektron, ale o dodatnim ładunku; zostały one nazwane pozytronami. Anderson otrzymał za swe odkrycie Nagrodę Nobla w 1936 roku, trzy lata po tym, jak Dirac odebrał swoją. Odkrycie to zmieniło pogląd fizyków na świat cząstek. Od dawna przypuszczali, że istnieje neutralna cząstka atomowa - neutron - którą James Chadwick odkrył w 1932 roku (za co otrzymał Nagrodę Nobla w roku 1935) i byli zadowoleni z koncepcji jądra atomowego zbudowanego z dodatnich protonów i neutralnych neutronów, otoczonego przez ujemne elektrony. Dla pozytronów jednak nie było w tym schemacie miejsca, a pomysł, że cząstki mogą powstawać z energii, całkowicie zmienił koncepcję cząstek elementarnych.

Każda cząstka w zasadzie może być wytworzona z energii w procesie opisanym przez Diraca, pod warunkiem że zawsze powstaje przy tym jej partner - antycząstka - czyli dziura w morzu ujemnej energii. Mimo że dzisiejsi fizycy preferują bardziej uczone wersje historii powstawania cząstek, reguły są w gruncie rzeczy te same, a jedna z głównych reguł mówi, że gdy cząstka napotyka swą antycząstkę, „wpada do dziury”, wyzwala energię $2mc^2$ i znika, wprawdzie nie w obłoku dymu, lecz w błyskach promieni gamma. Przed 1932 rokiem wielu fizyków obserwowało ślady cząstek w komorach mgłowych i wiele z tych śladów zapewne pochodziło od pozytronów, lecz aż do odkrycia Andersona zawsze zakładano, że ślady te pozostawiają elektrony poruszające się w kierunku jądra atomowego, a nie pozytrony biegnące w przeciwnym kierunku. Fizycy byli nieufni wobec idei nowych cząstek. Dzisiaj sytuacja jest odwrotna i, zdaniem samego Diraca: „ludzie są gotowi wprowadzić nową cząstkę na podstawie najbardziej błahych dowodów, zarówno teoretycznych, jak i doświadczalnych”⁵⁴. W rezultacie cząstkowy ogród zoologiczny zawiera dzisiaj nie dwie cząstki elementarne znane w latach dwudziestych, lecz ponad 200, z których wszystkie można wytworzyć w akceleratorach cząstek, jeśli dostarczy się odpowiedniej ilości energii⁵⁵. Większość tych cząstek jest wyjątkowo niestabilna - bardzo szybko się rozpada, w wyniku czego powstają inne cząstki oraz promieniowanie. Łatwo przeoczyć w tym zoo antyproton i antyneutron, które zostały odkryte w połowie lat pięćdziesiątych, co ostatecznie potwierdziło słuszność pierwotnej idei Diraca.

O cząstkowym zoo napisano wiele książek i wielu fizyków zrobiło karierę jako klasyfikatorzy cząstek elementarnych. Wydaje się jednak, że w takiej masie cząstek nie może być nic fundamentalnego. Sytuacja przypomina trochę spektroskopię widm atomowych przed powstaniem teorii kwantowej, gdy fizycy mierzyli i katalogowali zależności między liniami w różnych widmach, ale nie mieli pojęcia o przyczynach leżących u podstaw obserwowanych zależności. Coś znacznie bardziej fundamentalnego musi określać zasady kreacji tylu rodzajów cząstek. Podobny pogląd wyraził Albert Einstein w rozmowie ze swoim biografem Abrahamem Paisem w latach pięćdziesiątych: „Najwidoczniej uważał, że nie nadszedł jeszcze czas, aby martwić się o takie rzeczy, i że te cząstki w końcu pojawią się jako rozwiązania równań zunifikowanej teorii pola”⁵⁶. Uplłynęło trzydzieści lat i wydaje się, że Einstein miał rację. Ogólny zarys jednej z możliwych zunifikowanych teorii, zawierających owo cząstkowe zoo, podany jest w epilogu. Na razie wystarczy podkreślić, że olbrzymia eksplozja fizyki cząstek, która miała swój początek w latach czterdziestych, ma swe korzenie w pracach Diraca o teorii kwantowej - w pierwszych przepisach kwantowej książki kucharskiej.

⁵⁴ P. Dirac, *Directions in Physics*, s. 18.

⁵⁵ Obecnie obowiązujący tzw. model standardowy przewiduje tylko około 20 cząstek uważanych za elementarne (plus odpowiednie antycząstki), ale obejmuje on tylko trzy spośród czterech podstawowych oddziaływań. Rozmaite rozwinięcia tego modelu w kierunku pełnej unifikacji będą omówione w epilogu (przyp. tłum.).

⁵⁶ A. Pais, *Subtle is the Lord...*, s. 8.

Wnętrze jądra

Po triumfach mechaniki kwantowej w wyjaśnieniu zachowania atomów fizycy zwrócili się w kierunku fizyki jądrowej, ale pomimo wielu sukcesów praktycznych (wliczając w to reaktory jądrowe i bomby wodorowe) posiadany przez nas obraz zachowania całego atomu wciąż jest znacznie dokładniejszy niż obraz zachowania jądra. Nie jest to w zasadzie aż tak zaskakujące, jeśli się zważy, że promień jądra jest 100 000 razy mniejszy niż promień atomu. Objętość jest proporcjonalna do sześcianu promienia, więc bardziej sensownie jest powiedzieć, że atom jest tysiąc milionów milionów (10^{15}) razy większy niż jądro. Proste własności jądra jak masa i ładunek dosyć łatwo dają się zmierzyć. Pomiarów te prowadzą do koncepcji izotopów, czyli jąder o takiej samej liczbie protonów (które tworzą atomy o takiej samej liczbie elektronów i takich samych własnościach chemicznych), lecz o różnej liczbie neutronów, a zatem różniących się masą.

Wszystkie protony upchane w jądrze mają dodatni ładunek, a zatem odpychają się wzajemnie. Musi więc istnieć jakaś silniejsza forma „kleju”, który trzyma je razem - siła, która działa na bardzo krótki dystans odpowiadający rozmiarom jądra. Nazywamy ją silnym oddziaływaniem jądrowym. Istnieje także słabe oddziaływanie jądrowe, które jest słabsze od siły elektromagnetycznej, ale odgrywa ważną rolę w niektórych reakcjach jądrowych. Wydaje się, że neutrony w pewnym stopniu przyczyniają się do stabilności jądra, gdyż uwzględniając liczbę protonów i neutronów w stabilnych jądrach, fizycy uzyskują obraz bardzo podobny do struktury powłokowej elektronów w atomie. Największa liczba protonów znaleziona w naturalnie występującym jądrze uranu wynosi 92, aczkolwiek fizycy zdołali wytworzyć jądra zawierające aż 106 protonów. Są one niestabilne (z wyjątkiem niektórych izotopów plutonu o liczbie atomowej 94) i rozpadają się na inne jądra. Łącznie istnieje około 260 znanych stabilnych jąder. Stan naszej wiedzy o tych jądrach jeszcze dzisiaj jest mniej adekwatny niż model Bohra jako opis atomu, ale są wyraźne oznaki istnienia jakiejś struktury wewnątrz jądra.

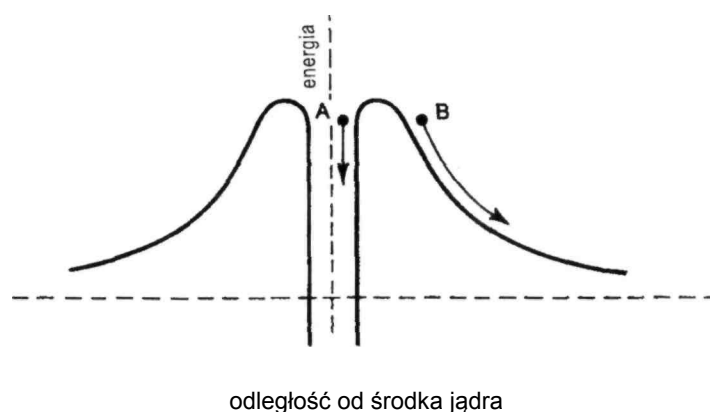
Szczególnie stabilne są jądra, które mają 2, 8, 20, 28, 50, 82 lub 126 nukleonów (neutronów lub protonów), a odpowiadające im pierwiastki częściej spotyka się w przyrodzie niż pierwiastki odpowiadające atomom z nieco innymi liczbami nukleonów. Dlatego liczby te są nazywane liczbami magicznymi. Jednak w strukturze jądra dominują protony, a dla każdego pierwiastka istnieje ograniczona liczba możliwych izotopów odpowiadających różnym liczbom neutronów. Możliwa liczba neutronów jest zwykle nieco większa niż liczba protonów i jeszcze bardziej się powiększa dla ciężkich pierwiastków. Szczególnie stabilne są jądra z magiczną liczbą zarówno protonów, jak i neutronów. Teoretycy przewidują zatem, że superciężki pierwiastek z około 114 protonami i 184 neutronami w jądrze powinien być stabilny⁵⁷ - ale tak masywne jądro nie zostało ani nigdy znalezione w przyrodzie, ani wyprodukowane w akceleratorach przez doklejanie kolejnych nukleonów do najbardziej masywnych jąder istniejących w naturze.

Najbardziej stabilnym ze wszystkich jąder jest żelazo-56. Lżejsze jądra „chciałyby” dostać więcej nukleonów i stać się żelazem, podczas gdy cięższe „chciałyby” stracić nukleony i w ten

⁵⁷ Istnienie podwójnie magicznego jądra ze 114 protonami i 184 neutronami przewidują teoretyczne ekstrapolacje jednego z modeli jądra, tzw. modelu powłokowego (przyp. tłum.).

sposób przesunąć się w kierunku najstabiiniejszej formy. Najlżejsze pierwiastki, wodór i hel, są przekształcane w cięższe jądra wewnątrz gwiazd w serii reakcji jądrowych, które spajają lekkie jądra ze sobą, tworząc takie pierwiastki jak węgiel i tlen w drodze do żelaza, i w rezultacie uwalniając energię. Gdy niektóre gwiazdy wybuchają jako supernowe, w procesach jądrowych wykorzystywana jest olbrzymia ilość energii grawitacyjnej, co przesuwają fuzję atomów powyżej żelaza, dzięki czemu powstają takie pierwiastki jak uran i pluton. Gdy ciężkie pierwiastki powracają ku najbardziej stabilnej konfiguracji, wyrzucając z siebie nukleony w formie cząstek alfa, elektronów, pozytronów albo pojedynczych neutronów, wydzielają także energię, która jest zmagazynowaną energią wybuchu supernowej, który jest odległy w czasie. Cząstka alfa jest zasadniczo jądrem atomu helu i zawiera dwa protony i dwa neutrony. Wyrzucając taką cząstkę, jądro zmniejsza swoją masę o cztery jednostki, a liczbę atomową o dwa. I wszystko to odbywa się w zgodzie z regułami mechaniki kwantowej i z zasadą nieoznaczoności odkrytą przez Heisenberga.

Nukleony są utrzymywane wewnątrz jądra przez silne oddziaływanie, ale gdyby tuż obok jądra znalazła się cząstka alfa, byłaby bardzo silnie odpychana przez siłę elektryczną. Połączony efekt tych dwóch sił tworzy coś, co fizycy nazywają studnią potencjału. Wyobraźmy sobie przekrój wulkanu o łagodnie opadających ścianach i głębokim kraterze. Piłka umieszczona tuż poza krawędzią krateru stoczy się wzdłuż zewnętrznej ściany; jeśli natomiast umieścimy ją tuż przy krawędzi, ale po wewnętrznej stronie, spadnie do środka. Nukleony w jądrze atomu znajdują się w podobnej sytuacji - są wewnątrz „krateru”, ale gdyby tylko udało im się przedostać przez krawędź, to „stoczą się” na zewnątrz pod wpływem siły elektrycznego odpychania. Problem w tym, że zgodnie z klasyczną mechaniką nukleony bądź też grupy nukleonów takie jak cząstka alfa po prostu nie mają dostatecznej energii, aby wydostać się z głębi krateru i wspiąć na wysokość krawędzi. Gdyby miały tyle energii, już dawno by ich tam nie było. Z punktu widzenia mechaniki kwantowej sytuacja jest jednak trochę inna. Ściana potencjału nadal stanowi barierę dla nukleonów, ale nie jest ona absolutnie nieprzekraczalna - istnieje określone, choć małe prawdopodobieństwo, że cząstka alfa może znaleźć się na zewnątrz, a nie wewnątrz jądra. W ramach zasady nieoznaczoności jedna z zależności Heisenberga dotyczy energii i czasu, i mówi, że energia dowolnej cząstki może być określona z dokładnością ΔE w czasie Δt , przy czym $\Delta E \Delta t$ jest większe niż \hbar . Na krótki czas cząstka może „pożyczyć” energię od zasady nieoznaczoności i dzięki temu przeskoczyć przez barierę potencjału, zanim będzie musiała oddać dług. Gdy wraca do swojego „właściwego” stanu energii, znajduje się tuż poza barierą potencjału i może uciec.



Ryc. 7.1. Studnia potencjału w samym środku jądra atomowego. Cząstka w położeniu A musi pozostać wewnątrz studni, chyba że jest obdarzona dostateczną energią, aby „przeskoczyć przez szczyt” do położenia B, skąd może bez przeszkód uciec. Kwantowa nieoznaczoność dopuszcza sytuację, w której cząstka może „tunelować” z A do B (lub z B do A), nawet jeśli nie ma dostatecznej energii, aby pokonać szczyt

Można też spojrzeć na ten proces z punktu widzenia nieokreśloności położenia. Cząstka, która znajduje się w pobliżu krawędzi, ale wewnątrz bariery, może pojawić się na zewnątrz, ponieważ jej położenie nie jest w mechanice kwantowej dokładnie określone. Im większa energia cząstki, tym łatwiej jej uciec, ale nie musi ona mieć takiej energii, jakiej wymagałaby teoria klasyczna. Jest to efekt czysto kwantowy, który przypomina trochę przeniknięcie cząstki przez tunel w ścianie krateru⁵⁸, i będący podstawową zasadą rozpadu radioaktywnego. Aby wyjaśnić fuzję jądrową, będziemy musieli odwołać się do innego modelu jądra.

Zapomnijmy na chwilę o pojedynczych nukleonach na ich powłokach i spójrzmy na jądro jak na kroplę cieczy. Podobnie jak drgająca kropla wody przybiera różne kształty, tak niektóre kolektywne własności jądra mogą być wyjaśnione przez zmianę kształtu. Duże jądro można uważać za taką drgającą kroplę zmieniającą nieustannie kształt: od kuli do pękatej hantli i odwrotnie. Jeżeli takiemu jądro dostarczy się energii, jego drgania mogą stać się na tyle silne, że rozerwą je na dwie części, przy akompaniamencie drobniejszych kropelek - cząstek alfa, beta, i neutronów. W przypadku niektórych jąder rozszczepienie to może być wywołane przez zderzenie z szybko poruszającym się neutronem. Może także powstać reakcja łańcuchowa, gdy każde rozszczepione w ten sposób jądro wytworzy dostateczną liczbę neutronów, aby przynajmniej dwa inne jądra w sąsiedztwie także uległy rozszczepieniu. W przypadku uranu 235, który zawiera 92 protony i 143 neutrony, powstają zawsze dwa niejednakowe jądra o liczbach atomowych z przedziału od 34 do 58 oraz deszcz wolnych neutronów. Każdy taki proces uwalnia około 200 MeV energii i wywołuje kilka następnych, jeżeli tylko próbka uranu jest dostatecznie duża, aby neutrony nie zdołały z niej

⁵⁸ Ta sama zasada działa w przeciwnym kierunku, gdy jądra łączą się w procesie fuzji. Gdy dwa lekkie jądra są przyciskane do siebie przez ciśnienie wewnątrz gwiazdy, mogą się połączyć tylko wtedy, jeżeli zdołają pokonać od zewnątrz barierę potencjału. Ilość energii, którą każde z nich dysponuje, zależy od temperatury w środku gwiazdy. W latach dwudziestych astrofizyków zaskoczyło odkrycie, że obliczona przez nich temperatura wewnątrz Słońca jest nieco mniejsza, niż wynikałoby z mechaniki klasycznej - jądra atomów w środku Słońca nie miały dostatecznej energii, aby pokonać barierę potencjału i połączyć się. Odpowiedź brzmi, że niektóre z nich „tunelują” przez barierę na nieco niższym poziomie energii, zgodnie z regułami mechaniki kwantowej. W ten sposób mechanika kwantowa wyjaśnia, dlaczego Słońce świeci, choć teoria klasyczna mówi, że nie powinno.

uciec. Jeśli pozwolimy na wykładniczy rozwój procesu rozszczepienia, otrzymamy bombę atomową; jeśli będziemy go hamować przez zastosowanie substancji, która pochłania neutrony tak, aby tylko nie wygasł, uzyskamy reaktor jądrowy, który można wykorzystać do zamiany wody w parę napędzającą generator elektryczności. Powstała w ten sposób energia pochodzi z procesów takich jak eksplozja gwiazdy, która nastąpiła bardzo dawno i bardzo daleko.

W doświadczeniu z fuzją możemy naśladować proces produkcji energii podobny do tego, który zachodzi w gwiazdzie takiej jak nasze Słońce. Jak dotąd umiemy skopiować jedynie pierwszy krok na drabinie syntezy, od wodoru do helu, i nie potrafimy kontrolować tej reakcji, lecz pozwalamy jej się w pełni rozwinąć (bomba wodorowa). Sztuczka z fuzją jest odwrotnością sztuczki z rozszczepieniem. Zamiast zachęcać duże jądro do rozpadu, musimy zmusić dwa małe jądra, aby zbliżyły się wbrew naturalnemu odpychaniu elektrostatycznemu ich dodatnich ładunków na tyle blisko, żeby silne oddziaływanie - które działa na bardzo krótki dystans - mogło pokonać siłę elektryczną i pociągnąć je ku sobie. Gdy tylko uda się zmusić kilka jąder do połączenia się w ten sposób, ciepło reakcji powoduje gwałtowny odśrodkowy ruch energii, który ma tendencję do rozpraszania innych jąder, co w efekcie zatrzymuje cały proces⁵⁹. Nadzieja na przyszłe nieograniczone źródło energii zależy od znalezienia sposobu na utrzymanie w miejscu dostatecznej liczby jąder na tyle długo, aby w tym czasie uzyskać użyteczną ilość energii. Ponadto jest istotne, aby odkryć proces, który wyzwala więcej energii, niż musimy zużyć na ściskanie składników reakcji. W bombie jest to całkiem łatwe - wystarczy otoczyć potencjalne składniki reakcji przez uran i następnie doprowadzić do wybuchu w procesie rozszczepienia uranu. Ciśnienie dośrodkowe pochodzące od wybuchu jądrowego doprowadzi dostateczną liczbę jąder wodoru do połączenia, co wyzwoli drugą - bardziej spektakularną - eksplozję w procesie fuzji. Nieco bardziej subtelne metody są konieczne do skonstruowania elektrowni. Obecnie badane techniki eksperymentalne obejmują użycie silnych pól magnetycznych tak ukształtowanych, aby działały jak butelka utrzymująca wewnątrz elektrycznie naładowane jądra, oraz wiązek światła laserowego, które fizycznie ścisną jądra. Lasery są oczywiście produkowane według jeszcze innego przepisu z kwantowej książki kucharskiej.

Lasery i masery

Aczkolwiek do odkrycia przepisów na tworzenie nowych cząstek w kuchni kwantowej potrzeba było szefa kuchni w rodzaju Diraca, procesy jądrowe można wyjaśnić, odwołując się do pojęć mniej nawet zaawansowanych niż model atomu Bohra. Zatem nie powinno być niespodzianką, że sam model Bohra wciąż znajduje zastosowania. Jedno z najbardziej egzotycznych i podniecających spośród niedawnych odkryć naukowych - lasery - może zrozumieć każdy

⁵⁹ Jedną z metod uzyskania energii w reakcji fuzji jest połączenie deuteru (izotopu wodoru, który ma jeden proton i jeden neutron) z trytem (jeden proton i dwa neutrony). Efektem reakcji jest jądro helu (dwa protony i dwa neutrony), swobodny neutron i 17,6 MeV energii. Gwiazdy istnieją jako wynik bardziej skomplikowanych procesów, gdzie w reakcje wchodzi wodór i niektóre inne jądra, np. węgiel, występujące wewnątrz gwiazd w małych ilościach. W rezultacie tych reakcji następuje połączenie czterech protonów w jądro helu, uwolnienie dwu elektronów i 26,7 MeV energii oraz wpuszczenie jądra węgla z powrotem w obieg, aby mogło katalizować kolejne cykle reakcji. Jednak w ziemskich laboratoriach badane są przede wszystkim procesy związane z trytem i deuterem.

kompetentny kucharz w kwantowym barze szybkiej obsługi, który słyszał o modelu Bohra. Wyjaśnienie tego zjawiska nie wymaga wielkiego geniuszu (do jego praktycznej realizacji konieczny był wszakże nie byle jaki talent, ale to już inna historia). Zatem, przepraszając Heisenberga, Borna, Jordana, Diraca i Schrödingera, zapomnijmy na chwilę o wszystkich kwantowych subtelnościach i wróćmy do tego zgrabnego modelu elektronów orbitujących wokół jądra atomowego. Pamiętajmy, że gdy (w tym modelu) atom pochłania kwant energii, to elektron przeskakuje na wyższą orbitę. W takim wzbudzonym atomie, pozostawionym samemu sobie, wcześniej czy później elektron spadnie z powrotem do stanu podstawowego, uwalniając bardzo dokładnie określony kwant promieniowania, o bardzo dokładnie określonej długości fali. Taki proces nosi nazwę emisji spontanicznej.

Gdy w 1916 roku Einstein badał takie procesy i tworzył statystyczne podstawy teorii kwantowej (którą później traktował z taką niechęcią), zdał sobie sprawę z jeszcze jednej możliwości. Wzbudzony atom może zostać zmuszony do uwolnienia swej dodatkowej energii i do powrotu do stanu podstawowego, jeśli zostanie „potrącony” przez przelatujący foton. Taki proces nazywamy emisją wymuszoną. Zdarza się on tylko wtedy, gdy wymuszający foton ma dokładnie taką samą długość fali jak ten, który mógłby zostać wyemitowany przez atom. Podobnie jak kaskadę neutronów powstającą w łańcuchowej reakcji fuzji jądrowej możemy sobie wyobrazić wiele wzbudzonych atomów, wzdłuż których przebiega foton o odpowiednio dobranej długości fali. W wyniku pobudzenia jednego z atomów do promieniowania, foton zyskuje towarzysza, wspólnie z którym wyzwala dwa kolejne, następnie cztery i tak dalej. W rezultacie powstaje kaskada promieniowania o tej samej częstotliwości. Ponadto ze względu na sposób wyzwolenia emisji wszystkie fale poruszają się w tym samym kierunku i w tej samej fazie - wszystkie grzbiety idą równocześnie „w górę”, a wszystkie doliny równocześnie „w dół” - tworząc bardzo dobrze ukierunkowaną wiązkę tak zwanego spójnego promieniowania. Grzbiety i doliny spójnego promieniowania nie kasują się nawzajem, więc cała energia wyemitowana przez atomy jest obecna w wiązce i może zostać skoncentrowana na małym obszarze materiału, na który wiązka padnie.

Gdy zbiór atomów lub cząsteczek zostanie wzbudzony przez energię cieplną, zapełniają one jakieś pasmo poziomów energetycznych i, pozostawione samym sobie, emitują energię w wiązkach światła o różnych długościach fali w niespójny i chaotyczny sposób, niosących efektywnie znacznie mniej energii, niż jej wydzielają atomy lub cząsteczki⁶⁰. Znamy sposoby pozwalające na zapełnienie w sposób wybiórczy wąskiego pasma poziomów energetycznych, a następnie na zmuszenie wzbudzonych do tego pasma atomów do przeskoku do stanu podstawowego. Mechanizmem wyzwalamy kaskadę jest słaba wiązka promieniowania o odpowiedniej częstotliwości; w rezultacie powstaje wzmocniona wiązka o tej samej częstotliwości. Techniki te zostały opracowane pod koniec lat czterdziestych, niezależnie od siebie w USA i w ZSRR, przy zastosowaniu promieniowania o częstotliwości radiowej w zakresie od 1 cm do 30 cm, zwanego

⁶⁰ Energia wyemitowanego promieniowania jest dokładnie równa energii wydzielonej przez świecące atomy, zgodnie z zasadą zachowania energii. Autor prawdopodobnie miał na myśli fakt, że nie da się energii niespójnego promieniowania wykorzystać tak efektywnie jak światła laserowego (przyp. tłum.).

promieniowaniem mikrofalowym. Uzyskane w ten sposób promieniowanie mikrofalowe powstaje w procesie wzmocnienia przez wymuszoną emisję promieniowania, według pomysłu Einsteina z 1917 roku. Pionierzy tej techniki, którzy w 1954 roku otrzymali Nagrodę Nobla, wprowadzili skrót MASER, pochodzący od angielskiego określenia Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation⁶¹.

Minęło dziesięć lat, zanim komukolwiek udało się znaleźć sposób, aby tego samego triku użyć do wzmocnienia częstości optycznych. W 1957 roku dwóch ludzi mniej więcej równocześnie wpadło na ten sam pomysł. Wydaje się, że pierwszy był Gordon Gould, doktorant na Uniwersytecie Columbia; drugim był Charles Townes, jeden z odkrywców masera, który w 1964 roku otrzymał Nagrodę Nobla. Kwestia, kto, kiedy i co dokładnie odkrył, była przedmiotem sporu, który zakończył się walką o prawa patentowe w sądzie, gdyż lasery, optyczny ekwiwalent maserów (od Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation⁶²), stanowią obecnie olbrzymi rynek (i olbrzymie pieniądze), ale na szczęście nie musimy się zajmować tutaj tą kwestią.

Spośród istniejących obecnie wielu typów laserów najprostsze są pompowane optycznie lasery „ciałostalowe”, w których materiałem aktywnym jest ciało stałe - kryształ. Pręt (np. kryształu rubidu) z płaskimi, wypolerowanymi końcami jest otoczony przez mocne źródło światła, odpowiedniego kształtu rurkę wyładowczą z gazem, która promieniuje w regularnych odstępach czasu (albo świeci ciągle), dając błyski światła o energii wystarczającej do wzbudzenia atomów w pręcie, stymulując (pompując) atomy do stanu wzbudzonego. Gdy przygotowany w ten sposób kryształ zostanie pobudzony do świecenia, z płaskiego końca pręta wyłania się wiązka czerwonego światła o mocy wielu tysięcy watów.

Wśród różnych wersji lasera mamy m.in. lasery gazowe, barwnikowe i półprzewodnikowe. Wszystkie charakteryzuje jedna wspólna cecha - niespójne światło jest dostarczane na wejściu⁶³, a na wyjściu otrzymuje się spójną wiązkę światła. Niektóre lasery, m.in. gazowe, dają ciągłą wiązkę - najdoskonalszą „linijkę” do pomiarów geodezyjnych, która znalazła także szerokie zastosowanie na koncertach rockowych i w przemyśle reklamowym. Inne produkują krótkotrwałe, ale o bardzo dużej mocy błyski, których można użyć do wiercenia dziur w twardych przedmiotach (i które kiedyś niechybnie znajdą zastosowania militarne). Laserowe narzędzia tnące są obecnie stosowane w tak różnych dziedzinach, jak przemysł odzieżowy i mikrochirurgia. Wiązka laserowa może zostać wykorzystana do przekazu informacji znacznie bardziej efektywnie niż fale radiowe, gdyż ilość informacji, która da się przekazać w ciągu jednej sekundy, rośnie wraz ze wzrostem częstości promieniowania. Kody paskowe na artykułach sprzedawanych w sklepach są czytane przez czytnik laserowy; dyski wideo i dźwiękowe dyski kompaktowe, które pojawiły się na początku lat osiemdziesiątych, również są czytane przez czytnik laserowy; trójwymiarowe fotografie (hologramy) są wytwarzane przy użyciu światła laserowego i tak dalej.

⁶¹ Dosłownie: wzmocnienie mikrofal przez wymuszoną emisję promieniowania (przyp. tłum.).

⁶² Dosłownie: wzmocnienie światła przez wymuszoną emisję promieniowania (przyp. tłum.).

⁶³ Źródłem energii lasera nie musi być światło ani nawet promieniowanie. Może to być energia reakcji chemicznej lub przepływ prądu elektrycznego (przyp. tłum.).

Lista zastosowań laserów jest nieograniczona. Gdy kupujemy paczkę płatków śniadaniowych, a laser odczytuje cenę z kodu paskowego, gdy oglądamy spektakularne pokazy laserowe na koncercie rockowym, gdy oglądamy w telewizji koncert transmitowany przez satelitę z drugiego końca świata, gdy słuchamy najnowszego nagrania tego samego zespołu na odtwarzaczu płyt kompaktowych, gdy podziwiamy magię obrazu holograficznego, pamiętajmy, że wszystko to zawdzięczamy Albertowi Einsteinowi i Nielsowi Bohrowi, którzy ponad sześćdziesiąt lat temu stworzyli podstawy teorii emisji wymuszonej.

Potężny mikro

Wpływ mechaniki kwantowej na nasze codzienne życie jest bez wątpienia najsilniejszy w dziedzinie fizyki ciała stałego. Sama nazwa „ciało stałe” jest mało romantyczna; nawet jeśli czytelnik tej książki słyszał to określenie, zapewne nie kojarzy go z teorią kwantową.

Jednak to właśnie ta dziedzina fizyki dała nam radio tranzystorowe, walkmana, elektroniczny zegarek, kieszonkowy kalkulator, mikrokomputer i działającą programowo pralkę. Nieznajomość fizyki ciała stałego nie wynika z faktu, że jest ona ezoteryczną dziedziną wiedzy, lecz stąd, że jej wszechobecność jest uznana za rzecz oczywistą. I znowu ta sama historia: bez wystarczającego opanowania kwantowej książki kucharskiej nie mielibyśmy żadnego z wyżej wymienionych urządzeń.

Działanie wszystkich tych urządzeń opiera się na własnościach półprzewodników. Są to materiały (ciała stałe), które z punktu widzenia przewodnictwa elektrycznego lokują się - zgodnie z nazwą - pomiędzy przewodnikami a izolatorami. Bez wchodzenia w szczegóły można powiedzieć, że izolatory to substancje, które nie przewodzą prądu elektrycznego, ponieważ elektrony w ich atomach są mocno związane z jądrami. W przewodnikach (np. w metalach) niektóre elektrony w każdym atomie są bardzo luźno związane z jądrem i znajdują się w stanach energetycznych położonych blisko wierzchołka atomowej studni potencjału (zgodnie z regułami mechaniki kwantowej). Gdy atomy są połączone ze sobą i tworzą jedno ciało, wierzchołek każdej studni potencjału łączy się ze studniami sąsiednich atomów; elektrony z tych wysokich poziomów mogą swobodnie przemieszczać się od jednego jądra do drugiego; nie są właściwie związane z żadnym konkretnym jądrem. To właśnie one stają się nośnikami prądu elektrycznego w przewodniku.

Zjawisko przewodnictwa elektrycznego opiera się w gruncie rzeczy na statystyce Fermiego-Diraca, która zakazuje tym luźno związanym elektronom spaść w głąb studni potencjału, gdyż wszystkie niżej leżące poziomy energii są zajęte przez silnie związane elektrony. Jeśli spróbujemy ścisnąć metal, napotykamy opór - metale są twarde. Przyczyną tego oporu i twardości metali jest zasada wykluczania Pauliego, zgodnie z którą będące fermionami elektrony nie mogą być ciaśniej upakowane.

Elektronowe poziomy energii w ciele stałym można wyliczyć za pomocą kwantowo-mechanicznego równania falowego. Elektrony trwale związane z jądrami znajdują się w tak zwanym paśmie walencyjnym, a elektrony przemieszczające się swobodnie od jednego jądra atomu do innego - w paśmie przewodnictwa. W izolatorze wszystkie elektrony znajdują się w

paśmie walencyjnym; w przewodniku niektóre „przelewają się” do pasma przewodnictwa⁶⁴. W półprzewodniku pasmo walencyjne jest wypełnione, a odstęp pomiędzy nim a pasmem przewodnictwa jest bardzo mały - zazwyczaj około 1 eV. Elektrony mogą stosunkowo łatwo przeskoczyć do pasma przewodnictwa i przenosić prąd elektryczny poprzez materiał półprzewodnika. Jednakże, w przeciwieństwie do zwykłego przewodnika, elektron, który zyskał potrzebną energię, aby przeskoczyć do pasma przewodnictwa, zostawia za sobą dziurę w paśmie walencyjnym. Dokładnie tak, jak było to w przypadku rozumowania Diraca na temat powstawania elektronów i pozytronów z energii, ten brak ujemnie naładowanego elektronu w paśmie walencyjnym można traktować - przynajmniej z punktu widzenia własności elektrycznych - jak ładunek dodatni. Tak więc naturalny półprzewodnik ma zazwyczaj kilka elektronów w paśmie przewodnictwa i kilka dodatnio naładowanych dziur w paśmie walencyjnym; jedno i drugie mogą przewodzić prąd. Możemy wyobrazić sobie kolejne elektrony wpadające do dziury w paśmie walencyjnym i zostawiające za sobą dziurę, która w rezultacie przemieszcza się w przeciwną stronę, w miarę jak wpadają do niej następne elektrony. Możemy też wyobrazić sobie dziury jako rzeczywiste, dodatnio naładowane cząstki poruszające się w kierunku odwrotnym do ruchu skaczących elektronów. Z punktu widzenia prądu elektrycznego efekt jest ten sam.

Naturalne półprzewodniki są bardzo interesujące, choćby dlatego, że stanowią trafną analogię do tworzenia pary elektron-pozytron. Bardzo trudno jest jednak kontrolować ich własności elektryczne, a to właśnie możliwość kontrolowania przepływu prądu wprowadziła półprzewodniki do naszego codziennego życia. Możliwość tę uzyskuje się, wytwarzając sztuczne półprzewodniki - jeden rodzaj zdominowany przez wolne elektrony, drugi - przez wolne „dziury”.

I tym razem trik ten łatwo jest zrozumieć, ale już trudniej zrealizować w praktyce. W kryształ germanu na przykład każdy atom ma cztery elektrony na zewnętrznej powłoce (ponownie znajdujemy się w kwantowym barze szybkiej obsługi, w którym wystarczy znajomość modelu Bohra), które są „wspólne” dla sąsiadujących atomów, w wyniku czego powstają wiązania chemiczne tworzące kryształ. Jeżeli kryształ germanu jest „domieszkowany” kilkoma atomami arsenu, w strukturze krystalicznej nadal dominują atomy germanu, więc atomy arsenu muszą się pomieścić najlepiej, jak to możliwe. Z punktu widzenia chemii główna różnica między germanem a arsenem polega na tym, że arsen ma pięć elektronów na zewnętrznej powłoce, więc dla arsenu najlepszym sposobem dopasowania się do germanowej struktury krystalicznej jest odrzucenie piątego elektronu i przyjęcie czterech wiązań chemicznych, dzięki czemu atom arsenu może udawać, że jest atomem germanu. Dodatkowe elektrony pochodzące od arsenu trafiają do pasma przewodnictwa półprzewodnika, ale nie pojawiają się odpowiadające im dziury. Taki kryształ nosi nazwę półprzewodnika typu n.

Drugi rodzaj półprzewodnika powstaje, gdy kryształ germanu (pozostańmy przy poprzednim przykładzie) „domieszkuje się” atomami galu, które mają tylko trzy elektrony dostępne do tworzenia wiązań chemicznych. Efekt jest taki, jakbyśmy stworzyli dziurę w paśmie walencyjnym

⁶⁴ Istnieje także inny rodzaj przewodnika, w którym samo pasmo walencyjne nie jest całkiem wypełnione, zatem elektrony mogą poruszać się w obrębie tego pasma.

(jedną dziurę na każdy domieszkowany atom galu). Elektrony walencyjne w takim półprzewodniku poruszają się, przeskakując od dziury do dziury, co daje złudzenie ruchu dodatnio naładowanych dziur. Interesujące rzeczy zaczynają się dziać, gdy złączymy ze sobą dwa typy półprzewodnika. Nadmiar dodatniego ładunku z jednej strony bariery i ujemnego z drugiej powoduje powstanie różnicy potencjału elektrycznego, która popycha elektrony w jednym kierunku i przeciwstawia się ich ruchowi w odwrotną stronę. Tego rodzaju układ dwóch kryształów półprzewodnikowych, zwany diodą, pozwala na przepływ prądu elektrycznego tylko w jednym kierunku. W trochę bardziej subtelnym układzie elektrony mogą zostać zachęczone do opuszczenia strefy n, przeskoczenia odstępu między kryształami i wskoczenia do dziury w strefie p, emitując przy okazji błysk światła. Taka wersja diody nosi nazwę diody luminescencyjnej, w skrócie LED (od Light Emitting Diode - dioda emitująca światło) i jest powszechnie używana w wyświetlaczach kieszonkowych kalkulatorów, zegarków i wielu innych urządzeniach. Działająca na odwrotnej zasadzie fotodiody pochłania kwanty światła, które przenoszą elektrony z dziur do sąsiedniego pasma przewodnictwa, w wyniku czego prąd elektryczny płynie tylko wtedy, gdy na półprzewodnik pada światło. Na tej zasadzie działają urządzenia kontrolujące drzwi automatyczne, które otwierają się, gdy ktoś stanie na drodze wiązki światła. Jednak półprzewodniki to nie tylko diody.

Gdy trzy kryształy półprzewodnika połączy się razem w układzie przypominającym kanapkę (pnp albo npn), powstaje tranzystor. Każdy z trzech kryształów w typowym tranzystorze jest zazwyczaj podłączony do obwodu elektrycznego, dzięki czemu tranzystor w radiu łatwo rozpoznać po trzech pająkowatych nóżkach sterzących z metalowego lub plastikowego pojemnika mieszczącego sam półprzewodnik. Stosując odpowiednio domieszkowane materiały, można uzyskać układ, w którym przepływ małego prądu przez jedną z dwóch barier (typu np) powoduje znacznie większy przepływ przez drugą barierę kanapki - tranzystor działa jak wzmacniacz. Każdy miłośnik elektroniki wie, że podstawowym elementem układu nagłaśniającego jest wzmacniacz. Jednak tranzystory są dzisiaj przeżytkiem - jeśli znajdziemy je w naszym radiu, to najwyższy czas rozejrzeć się za nowszym modelem.

W latach pięćdziesiątych urządzenia radiowe opierały się na lampach próżniowych, wskutek czego były duże, pełne kabli i zużywały mnóstwo prądu. Pod koniec lat pięćdziesiątych rewolucja półprzewodnikowa zastąpiła żarzące się lampy próżniowe małymi, poręcznymi tranzystorami, a zamiast kabli pojawiły się tzw. układy drukowane, czyli płytki z tekstolitu, na których obwody elektryczne nanoszono metodą druku, a tranzystory lutowano bezpośrednio do płytek. Stąd już tylko krok do układów scalonych, w których wszystkie obwody, półprzewodnikowe wzmacniacze, diody i wszystkie inne potrzebne komponenty stanowiły jeden zintegrowany układ, który stanowił na przykład elektroniczne serce radia, magnetofonu lub innego urządzenia. W tym samym czasie podobna rewolucja nastąpiła w przemyśle komputerowym.

Podobnie jak wczesne modele radia, tak i pierwsze komputery były duże, niewygodne, pełne lamp próżniowych i kilometrów kabli. Jeszcze dwadzieścia lat temu, w pełni rozkwitu rewolucji półprzewodnikowej, komputer potrzebny do tego samego zadania co współczesny „mikro” o

rozmiarach maszyny do pisania, wymagałby całego piętra dużego domu, aby pomieścić sam „mózg” i drugie tyle na układ klimatyzacyjny. Ta sama rewolucja umożliwiła postawienie komputera o podobnej mocy na biurku, a kupno za kilkaset dolarów, jak również zminiaturyzowała radio od lampowego mastodonta naszych dziadków, wielkości sporej walizki, do rozmiarów paczki papierosów. Następny etap rewolucji przenosi nas obecnie od tranzystora do układów zintegrowanych, tzw. czipów⁶⁵.

Biologiczny mózg i elektroniczny komputer mają jedną zasadniczą cechę wspólną - zajmują się przełączaniem. Mózg człowieka zawiera około 10 000 milionów przełączników, czyli neuronów zbudowanych z komórek nerwowych; przełączniki w komputerze zbudowane są z diod i tranzystorów. W latach pięćdziesiątych komputer o takiej liczbie przełączników jak mózg człowieka zająłby całą wyspę Manhattan. Dzięki dzisiejszej technologii pomieszczenie tej samej liczby przełączników w objętości ludzkiej głowy jest już wprawdzie technicznie możliwe, przy odpowiednim upakowaniu układów zintegrowanych, ale ich okablowanie byłoby dosyć problematyczne. Przedsięwzięcie to nie zostało jeszcze zrealizowane, ale powyższe porównanie dobrze ilustruje rozmiary współczesnych czipów.

Materiałem półprzewodnikowym stosowanym we współczesnych mikroukładach elektronicznych jest pospolity krzem - w zasadzie niczym się nie różniący od zwykłego piasku. Aby prąd elektryczny popłynął przez krzem, musi zostać do tego odpowiednio zachęcony. Produkcja tych układów zaczyna się od cięcia szerokich na około 10 cm kryształów krzemu na cienkie jak żyletka wafle, które następnie są dzielone na setki prostokątnych fragmentów (czipów), mniejszych od główki zapalki. W każdy z nich wprasowuje się, warstwa po warstwie jak w pizinger, gęstą i skomplikowaną siatkę obwodów elektrycznych - ekwiwalent tranzystorów, diod, układów scalonych i całej reszty. Jeden taki układ stanowi efektywnie cały komputer, wszystkie inne funkcje współczesnego mikro dotyczą przesyłania informacji do i od centralnego procesora. Układy te są tak tanie (pomijając znaczne koszty projektowania i ustawiania linii produkcyjnych), że można je produkować setkami, testować, a wadliwe egzemplarze po prostu wyrzucać. Koszt wykonania pierwszego układu może wynieść milion dolarów, natomiast każdy następny kosztuje zaledwie kilka centów.

Mamy zatem sporo urządzeń codziennego użytku, które zawdzięczamy kwantom. Przepisy z jednego tylko rozdziału kwantowej książki kucharskiej dały nam cyfrowe zegarki, domowe komputery, elektroniczne mózgi kierujące lotem kosmicznego wahadłowca na orbitę (i czasami decydujące o przerwaniu procedury startowej, choćby się to bardzo nie podobało kontrolerom), przenośne telewizory, układy stereofoniczne hi-fi o tak potężnej mocy, że potrafią ogłuszyć, czy doskonałe aparaty słuchowe zdolne skompensować utratę słuchu. Prawdziwie przenośne (kieszonkowe) komputery są już prawie w zasięgu naszych możliwości, prawdziwie inteligentne są również całkiem realne, aczkolwiek zapewne w nieco dalszej przyszłości. Komputery sterujące

⁶⁵ Angielskie słowo *chip* znaczy „wiór, drzazga, odprysk”. W żargonie komputerowym i elektronicznym określenie „chip” oznacza funkcjonalnie niezależny, zintegrowany układ elektroniczny będący elementem większego urządzenia. W języku polskim stosuje się albo oryginalną pisownię angielską, albo spolszczenie „czip”. Niektórzy mówią „kość” (przyp. tłum.).

ładownikami na Marsie i lotami sondy „Voyager” do krańców Układu Słonecznego są kuzynami układów sterujących grami telewizyjnymi, a wszystkie one mają swe korzenie w dziwnym zachowaniu elektronów przestrzegających podstawowych reguł kwantowych. Jednakże nawet historia potężnego mikro nie wyczerpuje całego potencjału fizyki ciała stałego.

Nadprzewodniki

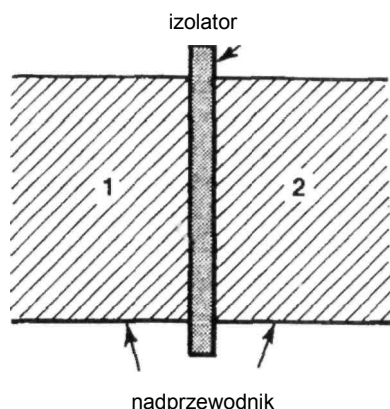
Nazwa ta jest równie trafna jak w przypadku półprzewodników. Nadprzewodnik to materiał, który przewodzi prąd elektryczny całkowicie bez oporu. Trudno sobie wyobrazić, że kiedykolwiek będziemy bliżej realizacji perpetuum mobile - nie jest to wprawdzie coś za nic, ale stanowi rzadki w fizyce przypadek, gdy dostaje się wszystko, za co się zapłaciło i nie jest się oszukany przy wydawaniu reszty. Działanie nadprzewodników opiera się na zmianie, jaka zachodzi, gdy dwa elektrony zaczną ze sobą współdziałać i poruszać się wspólnie. Każdy elektron ma wprawdzie spin połówkowy i stosuje się do reguł statystyki Fermiego-Diraca oraz zasady wykluczania Pauliego, ale para elektronów może w pewnych okolicznościach zachowywać się jak pojedyncza cząstka z całkowitym spinem. Cząstka taka nie podlega ograniczeniom zasady wykluczania i stosuje się do reguł statystyki Bosego-Einsteina, tych samych, które opisują (w kategoriach mechaniki kwantowej) zachowanie fotonów.

Zjawisko nadprzewodnictwa odkrył w 1911 roku holenderski fizyk Heike Kamerlingh-Onnes, gdy zauważył, że opór elektryczny rtęci spadł do zera, gdy została ona schłodzona poniżej 4,2 kelwina w absolutnej skali temperatury (4,2 kelwina odpowiada około -269° Celsjusza). Onnes otrzymał w 1913 roku Nagrodę Nobla za swoje prace w dziedzinie niskich temperatur, ale nie za odkrycie nadprzewodnictwa, lecz za skroplenie helu. Zjawisko nadprzewodnictwa nie zostało wyjaśnione aż do 1957 roku, gdy John Bardeen, Leon Cooper i Robert Schrieffer sformułowali teorię, która przyniosła im Nagrodę Nobla w 1972 roku⁶⁶. Wyjaśnienie ich opiera się na oddziaływaniu pary elektronów z atomami w sieci krystalicznej. Oddziaływanie jednego z nich z kryształem modyfikuje sposób, w jaki atomy kryształu działają na drugi elektron z pary. W rezultacie, pomimo ich naturalnej tendencji do wzajemnego odpychania, elektrony tworzą luźno związaną parę, co wystarcza do przejścia od statystyki Fermiego-Diraca do Bosego-Einsteina. Nawet niewielkie zaburzenia wywołane drganiami termicznymi niszczą efekt łączenia elektronów w pary, co jest zasadniczym powodem, dla którego zjawisko to zachodzi tylko w bardzo niskich temperaturach, w zakresie 1-10 kelwinów.

Nie wszystkie materiały mają własności nadprzewodzące, a w tych, w których da się je zaobserwować, zjawisko to zachodzi poniżej pewnej temperatury krytycznej, która jest różna dla różnych substancji; powyżej tej granicznej temperatury pary elektronów są rozrywane i materiał uzyskuje „normalne” właściwości elektryczne⁶⁷.

⁶⁶ Bardeen dał się poznać już wcześniej, gdy w 1948 roku, wspólnie z Williamem Shockleyem i Walterem Brattainem, dokonał wynalazku, za który wszyscy trzej w 1956 roku otrzymali Nagrodę Nobla. Ten niepozorny wynalazek nazywa się tranzystor, a John Bardeen jest pierwszą osobą, która dwukrotnie zdobyła Nagrodę Nobla z fizyki.

⁶⁷ W 1986 roku dwaj fizycy z laboratorium IBM w Zurychu, Georg Bednorz i Karl Alex Muller, odkryli zjawisko nadprzewodnictwa w materiałach zawierających tlenki miedzi, z temperaturą krytyczną 30

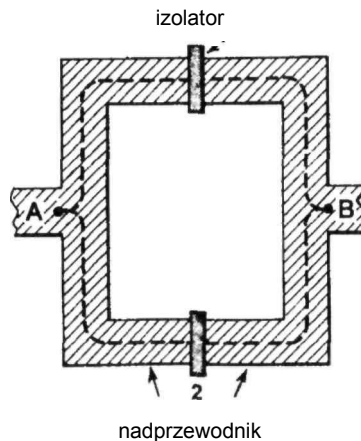


Ryc. 7.2. Złącze Josephsona jest areną niezwykłych zjawisk. Gdy dwa kawałki nadprzewodnika rozdzieli się warstwą izolatora, elektrony mogą w odpowiednich warunkach przedostać się przez przeszkodę

Teoria opiera się na fakcie, że materiały dobrze przewodzące w temperaturze pokojowej nie są najlepszymi nadprzewodnikami. Dobry „normalny” przewodnik pozwala elektronom poruszać się swobodnie, ponieważ nie oddziałują one zbyt mocno z atomami osadzonymi w siatce krystalicznej. Wszakże właśnie z tego powodu, z braku oddziaływania pomiędzy elektronami a atomami, sprzężenie elektronów w pary, które prowadzi do nadprzewodnictwa, nie jest dostatecznie efektywne w niskich temperaturach.

Konieczność schłodzenia nadprzewodników, aby mogły zadziałać, jest z oczywistych powodów niepożądana, ponieważ łatwo sobie wyobrazić potencjalne zastosowania bardziej poręcznych materiałów nadprzewodzących - wystarczy wspomnieć transmisję prądu liniami przesyłowymi bez strat energii. Nadprzewodniki mają także wiele innych umiejętności. Pole magnetyczne może przeniknąć normalnie przewodzący metal, ale nadprzewodnik ustawia na swej powierzchni prądy elektryczne w taki sposób, że odpychają one i wyrzucają na zewnątrz wszelkie pola magnetyczne. Gdyby nie konieczność schłodzenia do temperatury kilku kelwinów, byłby to bardzo praktyczny i zarazem doskonały ekran filtrujący niepożądane zakłócenia ze strony pól magnetycznych. Należałoby się spodziewać, że gdy dwa nadprzewodniki są oddzielone izolatorem, nie nastąpi między nimi przepływ prądu. Trzeba jednak pamiętać, że elektrony przestrzegają tych samych reguł kwantowych, które pozwalają niektórym cząstkom wydostać się (tunelować) z jądra atomowego. Przy dostatecznie cienkiej przeszkodzie prawdopodobieństwo przedostania się przez nią pary elektronów jest znaczne, ale efekt jest zupełnie nieoczekiwany. Takie złącza (zwane złączami Josephsona) nie przewodzą prądu, gdy istnieje różnica potencjału między dwoma końcami, ale gdy napięcie równa się zero, prąd zaczyna płynąć. Z kolei podwójne złącze Josephsona, wykonane z dwóch kawałków nadprzewodnika w kształcie widelców i dociśniętych końcami do siebie, z warstwą izolatora wstawioną pomiędzy dwie pary widełek, może naśladować zachowanie elektronu w eksperymencie z podwójną szczeliną. Zajmiemy się tym szczegółowo w następnym rozdziale, gdyż jest to jedno z najdziwniejszych zjawisk kwantowego świata.

kelwinów. Rok później otrzymali Nagrodę Nobla. W ciągu dziesięciu lat od tego odkrycia badania tzw. nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego przyniosły wiele nowych materiałów nadprzewodzących, z temperaturą krytyczną sięgającą 160 kelwinów (dane ze stycznia 1997 roku) (przyp. tłum.).



Ryc. 7.3. Dwa złącza Josephsona mogą zostać ustawione w sposób analogiczny do doświadczenia z dwiema szczelinami. W tym układzie powstaje interferencja elektronów - jeden z wielu dowodów na falową naturę tych „cząstek”

Nie tylko elektrony mogą w niskich temperaturach łączyć się w pseudobozonowe pary i naruszać zwykłe prawa fizyki. Atomy helu są zdolne do podobnego wyczynu dzięki pewnej własności zwanej nadciekłością. Gdy zamieszymy kawę w filiżance i wyjmemy łyżeczkę, krążący w cieczy wir będzie zwalniał, aż całkowicie się zatrzyma. Przyczyną jest zjawisko lepkości cieczy będące odpowiednikiem tarcia. Gdy zrobimy to samo w filiżance ciekłego helu schłodzonego poniżej 2,17 kelwina, wir nigdy nie zatrzyma się samoczynnie. Pozostawiony sam sobie ciekły hel może wspiąć się na ścianę filiżanki i przelać przez krawędź, a przez cienką rurkę przepłynie tym łatwiej, im mniejsza będzie jej średnica. Wszystkie te dziwne zjawiska można wytłumaczyć, odwołując się do statystyki Bosego-Einsteina. Jakkolwiek ich praktyczne zastosowania są ograniczone przez konieczność utrzymania niskiej temperatury, zachowanie atomów helu w tej temperaturze, podobnie jak zachowanie elektronów w nadprzewodniku, umożliwia nam bezpośrednią obserwację kwantowych procesów w akcji. Jeżeli do maleńkiego kubeczka, o średnicy mniej więcej 2 mm, nalejemy ciekłego helu i zaczniemy obracać kubeczek, w pierwszej chwili hel pozostanie nieruchomy. W miarę wzrostu prędkości obrotowej kubeczka hel pozostaje nadal nieruchomy, aż do chwili, gdy rotacja kubeczka osiągnie pewną krytyczną wartość. W tym momencie cała objętość helu nagle zaczyna wirować w wyniku zmiany momentu pędu od jednego stanu kwantowego do innego. Nie ma żadnych stanów pośrednich odpowiadających pośrednim wartościom momentu pędu - cały zbiór atomów helu, widoczny gołym okiem i nieporównanie większy niż pojedynczy atom lub jakakolwiek pojedyncza cząstka kwantowa, zachowuje się zgodnie z regułami mechaniki kwantowej. Także nadprzewodnictwo, jak się niebawem przekonamy, może być zastosowane w skali ludzkiej, a nie tylko atomowej. Teoria kwantowa nie jest ograniczona do świata fizyki ani nawet do nauk fizycznych. Jak pamiętamy, chemię można obecnie zrozumieć w kategoriach podstawowych reguł kwantowych. Chemia jest nauką o cząsteczkach, nie o indywidualnych atomach, a nasza wiedza o jednej z najważniejszych dla żywych organizmów cząsteczek - cząsteczce życia, DNA - jest mocno ugruntowana w teorii kwantowej.

Życie

Niezależnie od znaczenia teorii kwantowej w zrozumieniu chemii organizmów żywych, istnieją bezpośrednio osobiste związki pomiędzy niektórymi czołowymi bohaterami historii kwantów a odkryciem struktury podwójnej spirali DNA, cząsteczki życia. Prawa opisujące rozpraszanie promieni X na kryształach zostały odkryte przez Lawrence'a Bragga i jego ojca, Williama, pracujących w Cavendish Laboratory w latach poprzedzających pierwszą wojnę światową, za co wspólnie otrzymali Nagrodę Nobla. Lawrence był wówczas w tak młodym wieku (w 1915 roku odbywał służbę wojskową jako oficer we Francji), że pięćdziesiąt lat później mógł świętować złotą rocznicę tego wydarzenia. Starszy Bragg zdobył sobie uprzednio wysoką renomę w świecie fizyki, badając promienie alfa, beta i gamma, a pod koniec pierwszej dekady dwudziestego wieku wykazał, że zarówno promienie X, jak i gamma zachowują się pod pewnymi względami jak cząstki. Prawo Braggów o dyfrakcji promieni X, które jest kluczem do tajemnic kryształów, opiera się jednak na falowych własnościach promieni X odbijanych od atomów kryształu. Powstające w rezultacie struktury interferencyjne zależą od odległości atomów w kryształach oraz od długości fali promieniowania - w rękach doświadczonych badaczy narzędzie to stało się tak precyzyjne, że umożliwia określenie położenia pojedynczych atomów nawet w bardzo skomplikowanych kryształach.

Zrozumienie procesów fizycznych, które doprowadziło do sformułowania prawa Braggów, nastąpiło w 1912 roku, głównie za sprawą Lawrence'a Bragga. Pod koniec lat trzydziestych był on profesorem w Katedrze im. Cavendisha na uniwersytecie w Cambridge (jako następca Rutherforda, który zmarł w 1937 roku) i wciąż był czynnie zaangażowany w prace dotyczące promieni X, a także w wiele innych. W tym samym dziesięcioleciu nastąpił intensywny rozwój nowej nauki - biofizyki. Pionierska praca J.D. Bernala, który wyznaczył strukturę i skład molekuł biologicznych za pomocą dyfrakcji promieni X, otworzyła drogę szczegółowym badaniom skomplikowanych cząsteczek białkowych, pełniących wiele funkcji w organizmach żywych. Badacze Max Perutz i John Kendrew podzielili się Nagrodą Nobla z chemii w 1962 roku, przyznaną im za odkrycie struktury hemoglobiny (cząsteczki hemoglobiny są odpowiedzialne za transport tlenu w układzie krwionośnym) i mioglobiny (białka mięśni). Oba te odkrycia były wynikiem badań prowadzonych w Cambridge, a rozpoczętych przed drugą wojną światową.

Z początkami biologii molekularnej na zawsze zostaną związane nazwiska „młodych Turków”: Francis Crick i James Watson stworzyli model podwójnej spirali DNA we wczesnych latach pięćdziesiątych, za co otrzymali Nagrodę Nobla „z fizjologii lub medycyny” (wspólnie z Maurice'em Wilkinsem) w 1962 roku. Elastyczność Komitetu Noblowskiego, który przyznawał pionierom biofizyki nagrody z „chemii” albo „fizjologii”, jest godna podziwu, ale należy ubolewać, że ścisłe reguły nie pozwoliły im wyróżnić pośmiertnie koleżanki Wilkinsa, Rosalind Franklin. Zmarła w 1958 roku w wieku 37 lat Franklin wykonała większość prac krystalograficznych, które ujawniły strukturę DNA. W swojej książce *Podwójna Helisa* Watson przedstawił ją jako wojującą feministkę i taka już zapewne pozostanie w popularnym przekazie, mimo że barwna i zajmująca relacja Watsona z

okresu jego pobytu w Cambridge nie daje rzetelnego ani prawdziwego wizerunku jego kolegów, a nawet jego samego.

Badania Cricka i Watsona nad strukturą DNA były prowadzone w Cambridge, gdzie wciąż królował Bragg. Watson, młody Amerykanin po doktoracie, opisuje swoje pierwsze spotkanie z Braggiem, gdy prosił go o zgodę na pracę w Katedrze im. Cavendisha. U sześćdziesięcioletniego Bragga uderzyła go pewna staroświeckość - nazwał go bywalcem londyńskich klubów i był zaskoczony, gdy Bragg, wyraziwszy zgodę, okazał żywe zainteresowanie tematem i w trakcie badań, które doprowadziły do rozwiązania problemu DNA, udzielał cennych, chociaż nie zawsze dobrze odbieranych, wskazówek. Francis Crick był wprawdzie starszy od Watsona, ale formalnie wciąż był doktorantem. Jego kariera, podobnie jak wielu jego rówieśników, została przerwana przez drugą wojnę światową, aczkolwiek akurat w jego wypadku być może nie było to wcale takie złe. Początkowo studiował fizykę i dopiero pod koniec lat czterdziestych zwrócił się ku naukom biologicznym, w znacznym stopniu pod wpływem niewielkiej książeczki napisanej przez Schrödingera, a opublikowanej w 1944 roku pod tytułem *What is Life?* Ta klasyczna, wciąż wznawiana i warta przeczytania pozycja wyjaśnia ideę, zgodnie z którą podstawowe dla biologii cząsteczki dają się pojąć w obrębie praw fizyki. Cząsteczkami, które przede wszystkim wymagają wyjaśnienia, są geny niosące informację o strukturze i zasadach działania żywego organizmu. Gdy Schrödinger pisał *What is Life?*, geny uchodziły za struktury proteinowe, podobnie jak wiele innych żywych molekuł. Mniej więcej w tym czasie odkryto, że cechy dziedziczne organizmów są przenoszone przez cząsteczki kwasu zwanego kwasem dezoksyrybonukleinowym, który znaleziono w jądrach żywych komórek⁶⁸. To właśnie jest DNA, którego strukturę odkryli Crick i Watson, dzięki danym krystalograficznym uzyskanym przez Wilkinsa i Franklin przy użyciu promieni X.

Strukturę i rolę DNA w procesie życia opisałem szczegółowo w innej książce⁶⁹. Zasadniczą cechą tej podwójnej cząsteczki są dwa łańcuchy oplecione wzajemnie wokół siebie. Kolejność, w jakiej różne składniki chemiczne, zwane zasadami, są rozpięte wzdłuż nici DNA, stanowi informację, którą żywe komórki wykorzystują do budowy cząsteczek białka spełniających wszelkie funkcje życiowe, jak na przykład transport tlenu we krwi albo działanie mięśni. Łańcuch DNA może częściowo się rozwinąć, odkrywając wiele zasad działających jak szablon do konstrukcji innych cząsteczek, albo może odkręcić się całkowicie i stworzyć kopię samego siebie, wykonując duplikat każdej zasady rozpiętej wzdłuż rdzenia i budując w ten sposób lustrzane odbicie, wspólnie z którym stworzy drugą podwójną spiralę. Budulcem wykorzystywanym w tych procesach jest chemiczna „zupa” wewnątrz żywej komórki; oba procesy są kluczowe dla podtrzymania życia. Ludzkość potrafi obecnie manipulować informacją zakodowaną w łańcuchach DNA i zmieniać instrukcje zapisane w planach żywych organizmów - na razie tylko tych stosunkowo nieskomplikowanych. Takie są podstawy inżynierii genetycznej. Elementy materiału genetycznego

⁶⁸ Użycie określenia „jądro” dla środkowej części atomu w fizyce było nieprzypadkowym echem istniejącej terminologii biologicznej.

⁶⁹ J. Gribbin, J. Chermas, *The Monkey Puzzle*.

- DNA - można otrzymać przy użyciu połączonych technik chemicznych i biologicznych, a następnie organizmy żywe (np. bakterie) mogą zostać zachęczone do pozyskania tego materiału z otaczającego je środowiska i wbudowania go w swój własny kod genetyczny. Jeśli jakiemuś gatunkowi bakterii dostarczy się w ten sposób zakodowaną informację o tym, jak wytworzyć ludzką insulinę, to biologiczne fabryki bakterii będą produkować dokładnie to, co jest potrzebne cukrzykom, aby mogli prowadzić normalne życie. Marzenie o takiej zmianie ludzkiego materiału genetycznego, aby usunąć defekty będące przyczyną problemów zdrowotnych (np. cukrzyca) jest wciąż dalekie od spełnienia, ale nie istnieją przeszkody teoretyczne, które by na to nie pozwalały. Pierwszym krokiem będzie jednak zastosowanie technik inżynierii genetycznej na innych zwierzętach, a także na roślinach w celu wyhodowania gatunków lepiej zaspokajających potrzeby żywnościowe i wiele innych potrzeb ludzkości⁷⁰.

Szczegóły można znaleźć gdzie indziej⁷¹. Tutaj istotne jest to, że wszyscy słyszeliśmy o inżynierii genetycznej i wszyscy czytaliśmy o cudownych perspektywach (i potencjalnych zagrożeniach) jej dalszego rozwoju. Jednakże bardzo niewielu ludzi zdaje sobie sprawę, że zrozumienie struktury żywych molekuł, które umożliwiło rozwój inżynierii genetycznej, opiera się na zrozumieniu mechaniki kwantowej, bez której nie umielibyśmy zinterpretować wyników dyfrakcyjnych badań promieniami X, pomijając wszystkie inne aspekty. Aby zrozumieć konstrukcję albo rekonstrukcję genów, musimy najpierw zrozumieć, w jaki sposób i dlaczego atomy łączą się tylko w pewnych konfiguracjach, w pewnych odległościach i za pomocą wiązań chemicznych o określonej sile. Wiedza ta jest darem mechaniki kwantowej dla chemii i biologii molekularnej.

Poświęciłem temu tematowi tyle miejsca głównie ze względu na pewnego członka University College of Wales. W przeglądowym artykule w „New Scientist” z marca 1983 roku wspomniałem mimochodem, że „bez teorii kwantowej nie byłoby ani inżynierii genetycznej, ani komputerów, ani elektrowni jądrowych (ani bomb)”. Wywołało to protest czytelnika pochodzącego z tej szacownej instytucji akademickiej, który oznajmił, że ma już dosyć manii na punkcie inżynierii genetycznej i że Johnowi Gribbinowi nie powinny ująć na sucho tego rodzaju skandaliczne uwagi. Jaki w ogóle może być związek między teorią kwantową a genetyką? Mam nadzieję, że tym razem związek ten jest dla czytelników jasny. Z jednej strony mamy zachwycające fakty: zwrot Cricka w kierunku biofizyki był bezpośrednio zainspirowany przez Schrödingera; prace, które doprowadziły do odkrycia podwójnej spirali DNA, były prowadzone pod formalnym, aczkolwiek nie zawsze mile widzianym kierunkiem Lawrence'a Bragga. Z drugiej strony, zainteresowanie takich pionierów, jak Bragg i Schrödinger oraz następnego pokolenia fizyków - Kendrewa, Perutza, Wilkinsa i Rosalind Franklin - problemami biologicznymi było spowodowane faktem, że te problemy są, jak zauważył Schrödinger, po prostu innym rodzajem fizyki, zajmującym się dużymi zespołami atomów w złożonych molekułach.

⁷⁰ W 1997 roku na pierwsze strony gazet trafiły doniesienia o sklonowaniu owcy o imieniu Dolly (przyp. tłum.).

⁷¹ Na przykład w książce J. Cherfasa *Man Made Life*.

Nie tylko nie wycofuję się z uwagi, którą poczyniłem w „New Scientist”, ale ją wzmocnię. Gdybyśmy poprosili inteligentną, czytaną, ale nie związaną bezpośrednio z nauką osobę o podsumowanie najważniejszych dokonań nauki dla naszego życia, jak również o uwagi o możliwych pożytkach i zagrożeniach wynikających z postępu naukowego w najbliższej przyszłości, na liście z pewnością znalazłaby się technologia komputerowa (automatyzacja, bezrobocie, przemysł rozrywkowy, roboty), energia jądrowa (bomba, pociski nuklearne, elektrownie jądrowe, Czarnobyl), inżynieria genetyczna (nowe leki, klonowanie, zagrożenie chorobami wyprodukowanymi przez człowieka, lepsze gatunki upraw rolnych), lasery (holografia, broń laserowa, mikrochirurgia, telekomunikacja). Prawdopodobnie zdecydowana większość ankietowanych osób słyszałaby o teorii względności, która nie odgrywa żadnej roli w ich codziennym życiu, natomiast bardzo niewielu zdałoby sobie sprawę, że każda pozycja na powyższej liście ma swoje korzenie w mechanice kwantowej, dziedzinie nauki, o której mogli nigdy nie słyszeć i niemal z całą pewnością jej nie rozumieją.

Nie są w tym osamotnieni. Wszystkie te osiągnięcia powstały dzięki kwantowej książce kucharskiej, przy użyciu reguł, które sprawdzają się, mimo że nikt do końca nie rozumie dlaczego. Niezależnie od sukcesów ostatniego sześćdziesięciolecia należy wątpić, czy ktokolwiek rozumie, dlaczego kwantowe przepisy się sprawdzają. W dalszej części książki przyglądniemy się niektórym z bardziej tajemniczych zagadnień, które często się pomija, oraz paradoksom i przyszłym możliwościom.

CZĘŚĆ TRZECIA

...I DALEJ

Lepiej dyskutować o problemie
i nie rozwiązać go,
niż rozwiązać go, nie dyskutując o nim.

JOSEPH JOUBERT
1754-1824

Rozdział ósmy

Przypadek i prawdopodobieństwo

Zasada nieoznaczoności Heisenberga uchodzi dzisiaj za ważny - być może najważniejszy - element teorii kwantowej. Nie została ona natychmiast podchwyciona przez jego kolegów - upłynęło prawie dziesięć lat, zanim wyniesiono ją do tej rangi. Od lat trzydziestych przywiązuje się do niej być może nawet zbyt wielką wagę.

Sam pomysł pojawił się w wyniku wizyty Schrödingera u Bohra w Kopenhadze, we wrześniu 1926 roku, gdy poczynił on swą sławną uwagę o „przeklętych przeskokach kwantowych”. Heisenberg zdał sobie sprawę, że przyczyną częstych sporów Bohra i Schrödingera była różnica w rozumieniu pojęć. Pojęcia takie, jak „położenie”, „prędkość” (albo „spin”, który pojawił się później) po prostu mają w mikroświecie inne znaczenie od tego, które przypisujemy im w naszym codziennym życiu. Jakie więc mają znaczenie i w jaki sposób te dwa światy można ze sobą powiązać? Heisenberg powrócił do podstawowego równania mechaniki kwantowej,

$$pq - qp = \hbar/i,$$

i na jego podstawie wykazał, że iloczyn nieoznaczoności położenia Δq i pędu Δp musi być zawsze większy niż \hbar . Ta sama reguła odnosi się do każdej pary tak zwanych zmiennych sprzężonych. Wymiarem iloczynu każdej takiej pary, podobnie jak stałej \hbar , jest działanie, czyli energia pomnożona przez czas. Energia E i czas t są w istocie drugą bardzo ważną parą wielkości sprzężonych. Klasyczne pojęcia znane nam z codziennego życia istnieją, zdaniem Heisenberga, także w mikroświecie, ale mogą być stosowane jedynie w ograniczonym zakresie, narzuconym przez relacje nieoznaczoności. Im lepiej znamy położenie cząstki, tym mniej dokładnie możemy wyznaczyć jej pęd i vice versa.

Sens nieoznaczoności

Te zaskakujące wnioski zostały opublikowane w „Zeitschrift für Physik” w 1927 roku. Dirac, Bohr i inni teoretycy obeznani z nowymi równaniami mechaniki kwantowej natychmiast docenili doniosłe znaczenie konkluzji Heisenberga, ale większość doświadczalników pojęła je dosyć opacznie jako zakwestionowanie ich umiejętności eksperymentalnych. Traktując pracę Heisenberga jako stwierdzenie, że eksperymenty nie są dostatecznie dokładne, aby zmierzyć równocześnie położenie i pęd, próbowali przedstawić doświadczalne dowody przeciwko niej. Wysiłki te były oczywiście chybione, gdyż Heisenberg nie to miał na myśli.

Nieporozumienie to wciąż się pojawia, jeszcze w dzisiejszych czasach, częściowo dlatego, że sama idea nieoznaczoności jest często niewłaściwie przedstawiana. Heisenberg dla zilustrowania swej koncepcji posłużył się wyimaginowaną obserwacją elektronu. Aby cokolwiek zobaczyć, musimy obiekt obserwacji zbombardować (oświetlić) fotonami, które następnie trafiają do naszego oka. Fotony nie poruszają w widoczny sposób obiektu o rozmiarach domu, więc nie należy się spodziewać, że akt obserwacji domu może zmienić jego fizyczne parametry. W przypadku elektronu jest jednak zupełnie inaczej. Po pierwsze, elektron jest bardzo mały, więc musimy użyć fali elektromagnetycznej o małej długości, aby - za pomocą aparatury doświadczalnej - w ogóle go zobaczyć. Takie promieniowanie gamma ma bardzo dużą energię. Foton gamma, który odbije się od elektronu (i następnie zostanie zarejestrowany przez aparaturę), zasadniczo zmieni jego położenie i pęd. Jeżeli elektron znajduje się w atomie, sam akt obserwacji za pomocą mikroskopu na promienie gamma może wyrzucić elektron całkowicie poza atom.

Wszystko to jest prawdą w tym sensie, że daje nam ogólne pojęcie o niemożliwości precyzyjnego zmierzenia położenia i pędu elektronu. Jednak zasada nieoznaczoności mówi, że - zgodnie z podstawowym równaniem mechaniki kwantowej - nie istnieje nic takiego jak elektron, który ma równocześnie dokładnie określony pęd i dokładnie określone położenie.

Niesie to bardzo daleko idące konsekwencje. Heisenberg w swojej publikacji w „Zeitschrift für Physik” stwierdził: „Jest regułą, że nie możemy znać wszystkich szczegółów”. W tym miejscu teoria kwantowa odcina się od determinizmu klasycznych pojęć. Według Newtona można przewidzieć całą przyszłość, jeśli tylko zna się położenie i pęd każdej cząstki we wszechświecie. Według współczesnego fizyka jest to pomysł pozbawiony sensu, gdyż nie znamy dokładnie położenia i pędu nawet j e d n e j cząstki. Ten sam wniosek wynika z wszystkich wersji równań kwantowych - mechaniki falowej, macierzy Heisenberga-Borna-Jordana, liczb q Diraca. Metoda Diraca, który starannie unika jakichkolwiek fizycznych analogii ze światem codziennego doświadczenia, wydaje się w tym kontekście najlepsza. Faktycznie Dirac był bardzo blisko odkrycia relacji nieoznaczoności jeszcze przed Heisenbergiem. W pracy opublikowanej w „Proceedings of the Royal Society” w grudniu 1926 roku zwrócił uwagę, że w teorii kwantowej nie jest możliwa odpowiedź na żadne pytanie dotyczące wartości zarówno q , jak i p , aczkolwiek

„można się spodziewać, że jest możliwa odpowiedź na pytania, w których tylko q albo tylko p mają określone wartości liczbowe”.

Filozofowie dopiero w latach trzydziestych zajęli się konsekwencjami relacji nieoznaczoności dla zasady przyczynowości (która mówi, że każde zdarzenie ma za przyczynę jakieś inne określone zdarzenie) oraz dla zagadki przewidywania przyszłości. Tymczasem niektórzy wpływowi eksperci zaczęli uczyć teorii kwantowej, wychodząc od relacji nieoznaczoności, pomimo że zostały one wyprowadzone z podstawowych równań mechaniki kwantowej. Głównym inicjatorem tego trendu był prawdopodobnie Wolfgang Pauli. Napisane przez niego hasło, poświęcone teorii kwantowej, dla dużej encyklopedii zaczyna się od zasady nieoznaczoności, a jego kolega, Herman Weyl, pod wpływem Pauliego rozpoczął swój podręcznik *Theory of Groups and Quantum Mechanics*⁷² w podobny sposób. Ukazał się on po niemiecku w 1928 roku, a w tłumaczeniu na język angielski w roku 1931, i razem z artykułem Pauliego narzucił standard dla całej generacji podręczników. Kształceni na tych tekstach studenci z czasem sami zostawali profesorami i przekazywali ten sam styl nauczania następnym pokoleniom. W rezultacie studenci dzisiejszych uniwersytetów są najczęściej wprowadzani w mechanikę kwantową poprzez relacje nieoznaczoności⁷³.

W historii fizyki jest to przypadek dosyć szczególny. Zasady nieoznaczoności wynikają z podstawowych równań teorii kwantowej, ale przecież nie ma możliwości wyprowadzenia tych równań, jeśli się rozpocznie od relacji nieoznaczoności. Co gorsza, jeśli się nie zacznie od równań kwantowych, to jedynym sposobem na wprowadzenie zasady nieoznaczoności jest odwołanie się do przykładów w rodzaju wyżej wspomnianej obserwacji elektronów za pomocą mikroskopu na promienie gamma, co na ogół wywołuje u słuchaczy wrażenie, że zasada nieoznaczoności dotyczy ograniczeń metod doświadczalnych, a nie fundamentalnej prawdy o naturze wszechświata. Najpierw słyszą oni jedną rzecz, potem dowiadują się o czymś innym, a następnie ponownie odkrywają to, o czym już wcześniej słyszeli. Nauczyciele, jak również sama nauka, nie zawsze zachowują się logicznie. W rezultacie mamy całe pokolenia zdeorientowanych studentów i aurę nieporozumienia wokół zasady nieoznaczoności. Ci z nas, którzy usłyszeli o tej zasadzie we właściwej kolejności, uniknęli dezorientacji, ale jeśli zawilóści naukowe zbytnio nas nie przerażają i rzeczywiście pragniemy zgłębić dziwny świat kwantów, to warto zacząć odkrywanie tego świata od jednego ze szczególnych przykładów jego specyficznej natury. W porównaniu z tym, co napotkamy w dalszym ciągu tej książki, zasada nieoznaczoności jest jedną z najbardziej normalnych właściwości teorii kwantowej.

⁷² „Teoria grup i mechanika kwantowa” (przyp. tłum.).

⁷³ W tym miejscu warto wspomnieć o pewnym zabawnym zbiegu okoliczności. Zgodnie z tą metodą wprowadzenia w mechanikę kwantową w relacji nieoznaczoności najważniejsze są p i q . Znane angielskie powiedzenie „uważaj na p i q ” [w oryginale: *mind your p's and q's*], a oznaczające „bądź ostrożny”, pochodzi prawdopodobnie od uwag pod adresem dzieci uczących się alfabetu albo drukarzy pracujących z ruchomymi czcionkami, aby zwracali uwagę na położenie pionowych kreseczek u obu liter, ale teraz może być uważane za motto teorii kwantowej. O ile mi wiadomo, wybór tych liter w równaniach kwantowych był jednakże czystym przypadkiem.

Interpretacja kopenhaska

Jednym z ważnych aspektów zasady nieoznaczoności, nie zawsze docenianym, jest fakt, że nie działa ona w taki sam sposób w przód i wstecz w czasie. Bardzo niewiele zjawisk w fizyce „dba” o to, w którą stronę płynie czas. Jedną z podstawowych zagadek świata, w którym żyjemy, jest brak określonej „strzałki czasu” - rozróżnienia między przeszłością a przyszłością. Reguły nieoznaczoności mówią nam, że nie możemy znać położenia i pędu w tym samym czasie, a zatem nie potrafimy przewidzieć przyszłości. Przyszłość jest w swej istocie nieprzewidywalna i niepewna. Jednakże w całkowitej zgodzie z regułami mechaniki kwantowej da się przeprowadzić eksperyment, na podstawie którego można prowadzić rachunki wstecz i na przykład obliczyć, jakie było położenie i pęd elektronu w pewnej chwili w przeszłości. Przyszłość jest nieprzewidywalna - nie wiemy dokładnie, dokąd zmierzamy, ale przeszłość jest jasno określona - wiemy dokładnie, skąd przyszliśmy. Parafrazując Heisenberga, możemy powiedzieć: „Jest regułą, że możemy znać wszystkie szczegóły z przeszłości”. Ta fundamentalna własność kwantowego świata bardzo dobrze odpowiada naszemu codziennemu doświadczeniu czasu (który niesie nas od znanej przeszłości do nieznannej i niepewnej przyszłości) i może być także skojarzona ze strzałką czasu, którą obserwujemy w zjawiskach otaczającego nas wszechświata. Nieco bardziej osobliwe konsekwencje tego faktu przedyskutujemy później.

Kiedy filozofowie powoli zaczęli zmagać się z intrygującymi aspektami relacji nieoznaczoności, dla Bohra były one jak snop światła rozjaśniający koncepcje, ku którym od jakiegoś czasu zmierzał. Idea komplementarności, według której do zrozumienia kwantowego świata niezbędny jest opis zarówno falowy, jak i cząstkowy (aczkolwiek na przykład elektron nie jest ani falą, ani cząstką), znalazła swój matematyczny wyraz w relacjach nieoznaczoności, które mówią, że nie można poznać równocześnie i położenia, i pędu, gdyż stanowią one uzupełniające się i w pewnym sensie wzajemnie wykluczające aspekty rzeczywistości. Od lipca 1925 do września 1927 roku Bohr nie opublikował prawie nic na temat teorii kwantowej, jedynie wygłosił wykład w Como we Włoszech, w którym przedstawił szerokiej publiczności swą ideę komplementarności oraz to, co obecnie nazywa się kopenhaską interpretacją mechaniki kwantowej. Zwrócił wówczas uwagę, że w klasycznej fizyce wyobrażamy sobie układ oddziałujących cząstek jako coś w rodzaju mechanizmu zegarowego, którego działanie nie zależy od tego, czy jest obserwowany czy nie. Natomiast w fizyce kwantowej obserwator oddziałuje na układ w takim stopniu, że układ nie może istnieć całkowicie niezależnie. Decydując się zmierzyć dokładnie położenie, zmuszamy cząstkę do zwiększenia nieoznaczoności jej pędu i vice versa. Decydując się na zbadanie własności falowych układu, eliminujemy własności cząstkowe; żaden eksperyment nie ujawnia zarówno falowych, jak i cząstkowych aspektów w tym samym momencie; i tak dalej. W fizyce klasycznej potrafimy precyzyjnie opisać położenia i pędy cząstek w czasoprzestrzeni oraz równie precyzyjnie przewidzieć ich zachowanie; w fizyce kwantowej nie da się tego uczynić. W tym sensie nawet teoria względności jest teorią „klasyczną”.

Upłynęło dużo czasu, zanim idee te zostały sformułowane i zanim ich znaczenie się utrwaliło. Dzisiaj kluczowe aspekty interpretacji kopenhaskiej można najłatwiej wyjaśnić i zrozumieć w kategoriach tego, co się dzieje, gdy fizyk przeprowadza eksperyment. Po pierwsze, musimy przyjąć do wiadomości fakt, że sam akt obserwacji przedmiotu zmienia go i że obserwator jest w najzupełniej realnym sensie częścią eksperymentu - nie ma mechanizmu zegarowego, który tyka niezależnie od tego, czy patrzymy na niego czy nie. Po drugie, wszystko, co znamy, to wyniki eksperymentów. Możemy spojrzeć na atom i stwierdzić, że elektron jest w stanie *A*, następnie spojrzeć ponownie i znaleźć elektron w stanie *B*. Zgadujemy, że elektron przeskoczył z *A* do *B*, być może wskutek naszego patrzenia na niego. W gruncie rzeczy nie możemy nawet być pewni, że to ten sam elektron i nie możemy nic powiedzieć o tym, co robił w czasie, gdy na niego nie patrzyliśmy. To, czego możemy się dowiedzieć z eksperymentów lub z równań teorii kwantowej, to prawdopodobieństwo, że jeśli za pierwszym razem układ był w stanie *A*, to przy powtórnym spojrzeniu znajdziemy go w stanie *B*. Absolutnie nic nie potrafimy powiedzieć o tym, co się działo, gdy nie patrzyliśmy na układ, ani o tym, w jaki sposób układ przechodzi ze stanu *A* do *B* (jeśli w ogóle to robi). „Przekłęte przeskoki kwantowe”, które tak niepokoiły Schrödingera, to tylko i wyłącznie nasza interpretacja tego, co się dzieje i dlatego otrzymujemy dwie różne odpowiedzi w tym samym eksperymencie; i jest to interpretacja fałszywa. Czasami obiekt jest w stanie *A*, czasami w *B*?, a pytanie, co jest pomiędzy, albo w jaki sposób następuje przejście z jednego stanu do drugiego, jest całkowicie pozbawione sensu.

Jest to fundamentalna własność świata kwantów. Dostatecznie interesująca jest ograniczoność naszej wiedzy o tym, co elektron robi, gdy patrzymy na niego, ale świadomość, że nie mamy pojęcia o tym, co robi, gdy nań nie patrzymy, jest absolutnie szokująca.

W latach trzydziestych sir Arthur Eddington w swojej książce *The Philosophy of Physical Science* przedstawił kilka spośród najlepszych fizycznych przykładów ilustrujących znaczenie tych ograniczeń. Bardzo sugestywny, burzący stereotypowe oczekiwania i niepokojący w swej prostocie wywód Eddingtona podkreśla, że to, co widzimy i czego „dowiadujemy” się z eksperymentów, jest silnie zabarwione przez nasz sposób postrzegania rzeczywistości. Przypuśćmy, mówi Eddington, że artysta rzeźbiarz powie nam, że w bloku marmuru „ukryty” jest kształt ludzkiej głowy. Nonsens, brzmi odpowiedź. Jednak rzeźbiarz odłupuje marmur i wydobywa zapowiedzianą formę, za pomocą tak mało precyzyjnych narzędzi jak młotek i dłuto. Czy w ten właśnie sposób Rutherford „odkrył” jądro atomowe? „Odkrycie to nie wykracza poza fale, do których sprowadza się nasza wiedza o jądrze” mówi Eddington, gdyż nikt nigdy nie widział jądra atomu. To co widzimy, to wyniki eksperymentów, które następnie interpretujemy jako jądro. Nikt nie widział pozytronu, zanim Dirac nie zasugerował jego istnienia. Fizycy twierdzą dzisiaj, że znają więcej tak zwanych elementarnych cząstek, niż mamy różnych pierwiastków na tablicy okresowej. W latach trzydziestych fizyków intrygowała możliwość istnienia jeszcze jednej cząstki - neutrina - potrzebnego do wyjaśnienia subtelności związanych z oddziaływaniem spinów w pewnych rozpadach radioaktywnych. „Teoria neutrina nie robi na mnie dużego wrażenia” - powiedział Eddington - „nie wierzę w neutrina”,

jednak „czy ośmielę się powiedzieć, że fizycy eksperymentalni nie będą mieli dość fantazji, aby stworzyć neutrino?”

Od tego czasu neutrina rzeczywiście zostały „odkryte” i to w trzech różnych odmianach (plus ich trzy różne antyodmiany), a kolejne odmiany są wciąż postulowane. Czy wątpliwości Eddingtona należy zatem traktować dosłownie? Czy jest możliwe, że jądro atomowe, pozytron i neutrino rzeczywiście nie istniały, zanim eksperymentatorzy nie odkryli właściwego dłuta, aby wydobyć ich formę? Tego rodzaju spekulacje są sprzeczne ze zdrowym rozsądkiem, nie mówiąc już o poczuciu rzeczywistości. Jednak w świecie kwantów są to bardzo sensowne pytania. Jeśli zastosujemy się ściśle do przepisu z kwantowej książki kucharskiej, możemy przeprowadzić eksperyment dający w rezultacie pewien zestaw wskazań na licznikach i przyrządach, które z kolei my interpretujemy jako dowód istnienia pewnego rodzaju cząstki. Prawie za każdym razem uzyskujemy ten sam model wskazań, ale interpretacja jest jedynie tworem naszego umysłu - równie dobrze może być ona tylko złudzeniem. Równania nic nam nie mówią o tym, co cząstki robią, gdy na nie nie patrzymy, a przed Rutherfordem nikt nigdy nie obserwował jądra atomowego i przed Dirakiem nikt nigdy nie wyobrażał sobie pozytronu. Jeżeli nie możemy powiedzieć, co robi cząstka, gdy na nią nie patrzymy, nie możemy także powiedzieć, czy w ogóle istnieje, gdy na nią nie patrzymy, a zatem możemy równie dobrze stwierdzić, że jądra atomowe i pozytrony nie istniały przed początkiem dwudziestego stulecia, ponieważ nikt ich wtedy nie obserwował. W świecie kwantów otrzymujemy to, co widzimy⁷⁴ i nic nie jest rzeczywiste. Co najwyżej możemy mieć nadzieję na pewne złudzenia, niektóre nawzajem zgadzają się ze sobą. Niestety nawet tę nadzieję niweczy jeden z najprostszych eksperymentów. Pamiętamy eksperyment z podwójną szczeliną, który „wykazał” falową naturę światła. W jaki sposób można go wytłumaczyć w kategoriach fotonów?

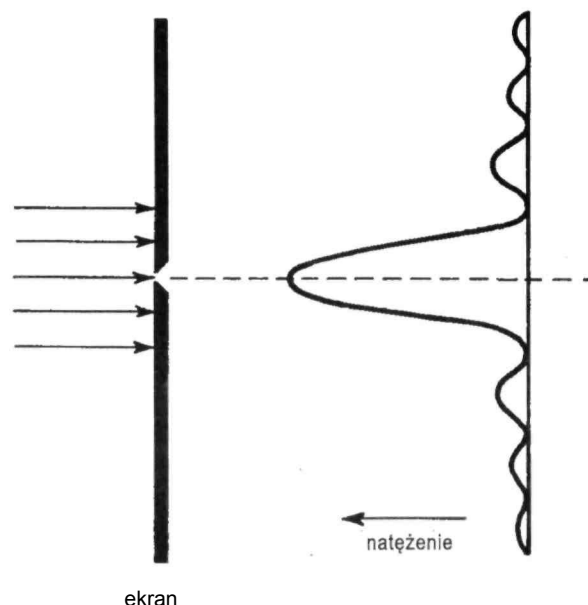
Eksperyment z dwiema szczelinami

Jednym z najlepszych i najbardziej znanych nauczycieli mechaniki kwantowej w ciągu ostatnich dwudziestu lat był Richard Feynman z Kalifornijskiego Instytutu Technologicznego (California Institute of Technology). Trzytomowe *Feynmana Wykłady z fizyki*, opublikowane we wczesnych latach sześćdziesiątych, do dziś wyznaczają standard, z którym porównuje się inne podręczniki. Był on także autorem licznych popularnych wykładów z fizyki, na przykład telewizyjnej serii w BBC w 1965 roku, która została opublikowana w formie książkowej jako *The Character of Physical Law*. Urodzony w 1918 roku Feynman w latach czterdziestych przeżywał szczytowy okres swej kariery jako fizyk teoretyk, gdy uczestniczył w formułowaniu równań kwantowej wersji elektromagnetyzmu, zwanej elektrodynamiką kwantową. W 1965 roku otrzymał za tę pracę Nagrodę Nobla. Szczególne miejsce Feynmana w historii teorii kwantowej wynika z tego, że był on przedstawicielem pierwszego pokolenia fizyków, którzy dorośli, gdy istniały już wszystkie fundamenty mechaniki kwantowej i sformułowano wszystkie podstawowe reguły. Podczas gdy Heisenberg i Dirac pracowali we wciąż zmieniających się warunkach, gdy nowe idee nie zawsze pojawiały się we

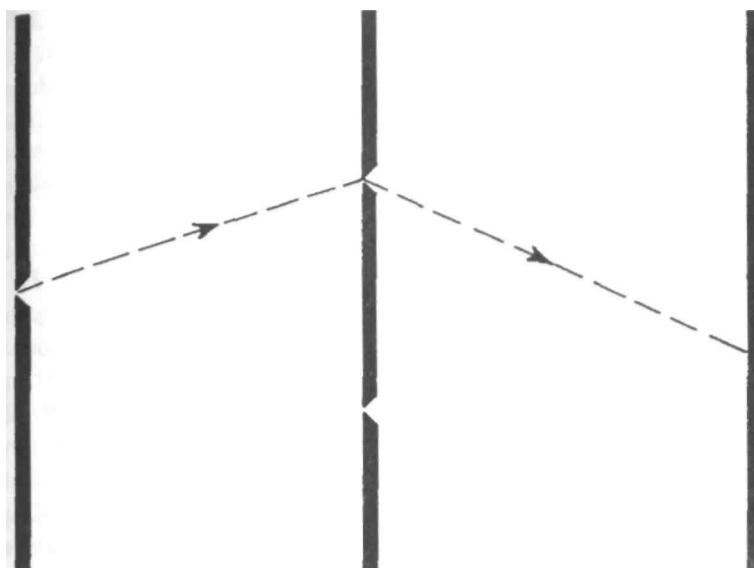
⁷⁴ Ang.: *what you see is what you get* - „dostajesz to, co widzisz” - slogan reklamowy niektórych wczesnych edytorów komputerowych (przyp. tłum.).

właściwej kolejności, a związki logiczne między różnymi pojęciami nie zawsze były od razu oczywiste (np. w przypadku spinu), pokolenie Feynmana pierwsze zastało wszystkie części układanki na właściwym miejscu, a logika ich ułożenia była widoczna, być może nie na pierwszy rzut oka, ale z całą pewnością po pewnym namyśle i intelektualnym wysiłku. Znaczące jest, że o ile pokolenie Pauliego uważało, zapewne pod wpływem emocji związanych z własnymi odkryciami, że punktem wyjścia do dyskusji i nauczania teorii kwantowej powinny być relacje nieoznaczoności, o tyle Feynman i inni nauczyciele, którzy w ciągu ostatnich kilku dziesięcioleci samodzielnie ocenili logikę teorii kwantów, zamiast powielać idee poprzednich pokoleń, przyjęli całkiem inny punkt wyjścia. Na pierwszej stronie tomu swoich wykładów, poświęconego mechanice kwantowej, Feynman mówi, że podstawowym elementem teorii kwantowej jest eksperyment z podwójną szczeliną. Dlaczego? Ponieważ jest to „zjawisko niemożliwe, absolutnie niemożliwe do wyjaśnienia w żaden klasyczny sposób; stanowi samo sedno mechaniki kwantowej. W rzeczywistości zawiera jedyną tajemnicę... podstawową osobliwość całej mechaniki kwantowej”.

Wszystkie pojęcia kwantowe, o których do tej pory pisałem w tej książce, starałem się, podobnie jak wielcy fizycy z trzeciej dekady naszego wieku, wyjaśniać w kategoriach zaczerpniętych z codziennego życia. Nadszedł czas, aby zdjąć końskie okulary i, poczynając od głównej tajemnicy, wyjaśnić rzeczywisty świat w kategoriach kwantowych na tyle, na ile jest to możliwe. Nie mamy adekwatnych analogii, które moglibyśmy przenieść z naszego codziennego doświadczenia do świata kwantów, gdyż w niczym nie przypomina on czegokolwiek znajomego. Nikt nie wie, jak to się dzieje, że świat kwantów zachowuje się tak, a nie inaczej - wszystko, co wiemy, to to, że jest tak, jak jest. Istnieją tylko dwa punkty zaczepienia.



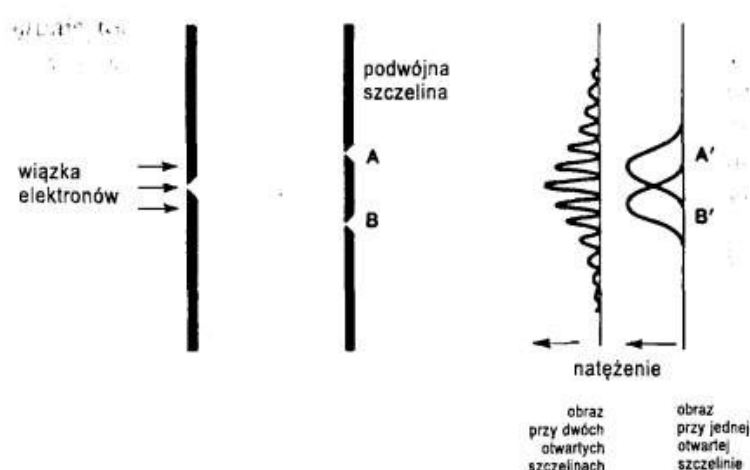
Ryc. 8.1. Wiązka elektronów przechodząca przez pojedynczą szczelinę daje na ekranie rozkład, w którym większość „cząstek” trafia w miejsce położone na wprost szczeliny



Ryc. 8.2. Zdrowy rozsądek sugeruje, że elektron lub foton przechodzący przez jedną z dwóch szczelin „powinien” zachowywać się tak, jakby przeszedł przez pojedynczą szczelinę

Pierwszy polega na tym, że zarówno „cząstki” (elektrony), jak i „fale” (fotony) zachowują się w ten sam sposób - reguły gry są konsekwentne. Drugi punkt zaczepienia to fakt, że jest tylko jedna tajemnica, jak by powiedział Feynman. Jeśli potrafimy przejść do porządku dziennego nad eksperymentem z dwiema szczelinami, to bitwa jest wygrana co najmniej w połowie, gdyż „każda inna sytuacja w mechanice kwantowej może, jak się okazuje, zostać wyjaśniona następująco: »Pamiętasz przypadek z dwiema szczelinami? To jest to samo«⁷⁵.

Eksperyment przedstawia się następująco. Wyobraźmy sobie jakikolwiek ekran, na przykład ścianę, z dwoma otworami. Mogą one być długie i wąskie jak szczeliny w sławnym eksperymencie Younga, ale równie dobre będą małe okrągłe otwory.



Ryc. 8.3. Doświadczenia pokazują, że gdy obie szczeliny są otwarte, zarówno elektrony, jak i fotony tworzą obraz różny od prostej sumy obrazów otrzymywanych przy każdej szczelinie z osobna

⁷⁵ R. Feynman, *The Character of Physical Law*, s. 130.

Jeżeli pracujemy z elektronami, to ekran może być pokryty matrycą detektorów elektronowych lub też możemy sobie wyobrazić jeden detektor na kółkach, który można przesunąć w dowolne miejsce, aby zmierzyć, ile elektronów pada na jakiś określony punkt na ekranie. Szczegóły są nieistotne, dopóki potrafimy zarejestrować, co się dzieje na ekranie. Po drugiej stronie ekranu z otworami znajduje się źródło fotonów, elektronów lub innego rodzaju cząstek. Może to być lampa albo działło elektronowe w rodzaju tych, które tworzą obraz na ekranie naszego telewizora; szczegóły znów są nieistotne. Co się dzieje, gdy cząstka przedostaje się przez oba otwory i pada na ekran - jaki wzór powstanie w naszym detektorze?

Po pierwsze, zróbmy krok wstecz i zobaczmy, co się dzieje w naszym codziennym świecie. Łatwo stwierdzić, że przy przejściu przez otwory fale uginają się, wystarczy w tym celu przeprowadzić podobny eksperyment ze zbiornikiem z wodą. Źródłem niech będzie jakiegokolwiek mechaniczne urządzenie poruszające się rytmicznie w górę i w dół; wytwarzające fale. Fale rozbiegają się z obu otworów i tworzą regularny wzór grzbietów i dolin wzdłuż linii detektorów, ze względu na interferencję dwóch fal nadchodzących z obu otworów. Jeśli zasłonimy jeden z otworów w ścianie, wysokość fal zmienia się w prosty i regularny sposób. Fale są największe na wprost otworu, w najmniejszej odległości ekranu od otworu, a po obu stronach amplituda fali jest mniejsza. Ten sam wzór pojawi się, gdy zasłonimy pierwszy otwór, a odsłonimy drugi, który do tej pory był zablokowany. Natężenie fali, będące miarą ilości energii niesionej przez falę, jest proporcjonalne do kwadratu wysokości (amplitudy) fali H , i zachowuje się podobnie dla każdego otworu z osobna. Gdy oba otwory są odsłonięte, wzór na ekranie jest znacznie bardziej skomplikowany. Pojawia się, rzecz jasna, wierzchołek natężenia na wprost obu otworów, ale natężenie tuż obok tego wierzchołka, w miejscu gdzie dwie fale nawzajem się znoszą, jest bardzo małe, a wzdłuż ekranu powtarza się wzór naprzemiennych wysokich i niskich natężeń. Gdy spojrzymy na to od strony matematycznej, okazuje się, że natężenie fali na ekranie przy obu otworach otwartych nie jest sumą natężeń pochodzących od pojedynczych otworów (sumą kwadratów amplitud), lecz kwadratem sumy amplitud dwóch fal biegnących od obu otworów. Jeśli amplitudy obu fal wyrazimy odpowiednio przez H i J , to natężenie wypadkowe I jest równe $H^2 + J^2$, lecz jest dane przez wyrażenie

$$I = (H + J)^2,$$

co sprowadza się do

$$I = H^2 + J^2 + 2HJ.$$

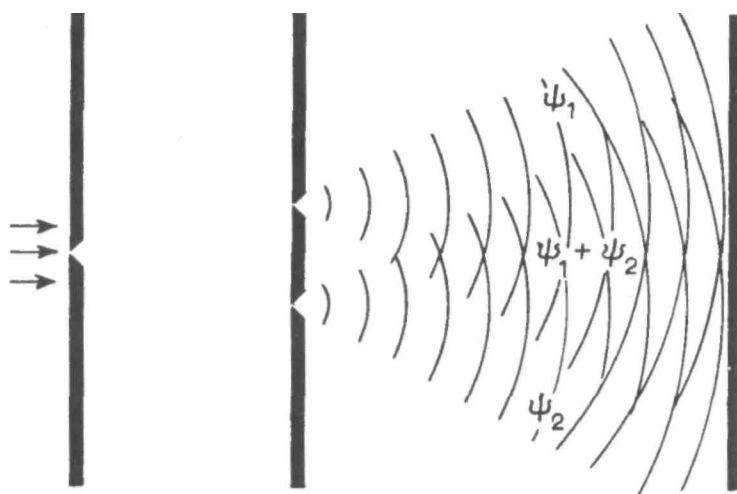
Dodatkowy składnik bierze się z interferencji dwóch fal i dokładnie wyjaśnia wierzchołki i doliny we wzorze interferencyjnym, jeżeli uwzględnić, że H i J mogą być zarówno dodatnie, jak i ujemne.

Gdybyśmy przeprowadzili to samo doświadczenie, ale przy użyciu dużych cząstek ze świata makroskopowego (Feynman przewrotnie opisuje eksperyment z użyciem karabinu maszynowego strzelającego przez otwory w ścianie oraz ustawionych w charakterze detektora wiader piasku, które zatrzymują i gromadzą kule), nie byłoby żadnego „składnika interferencyjnego”. Po wystrzeleniu przez otwory dużej liczby pocisków znaleźlibyśmy je w różnych ilościach w różnych

wiadrach. Przy otwartym tylko jednym otworze rozkład pocisków na „ekranie” byłby bardzo podobny do rozkładu natężenia fal na wodzie także przy odsłoniętym jednym otworze. Jednak przy obu otworach odsłoniętych liczba pocisków znalezionych w różnych pojemnikach byłaby rzeczywiście sumą efektów pochodzących od dwóch otworów - większość kul w obszarze na wprost otworów oraz spory spadek „natężenia” po każdej stronie, bez żadnych wierzchołków i zaników spowodowanych przez interferencję. W tym wypadku każdy pocisk można uważać za nośnik jednostki energii, a rozkład natężenia wyraża się jako

$$I = I_1 + I_2,$$

gdzie I , odpowiada H^2 , a I_1 to J^2 z przykładu z falami na wodzie. Składnik interferencyjny nie pojawia się.



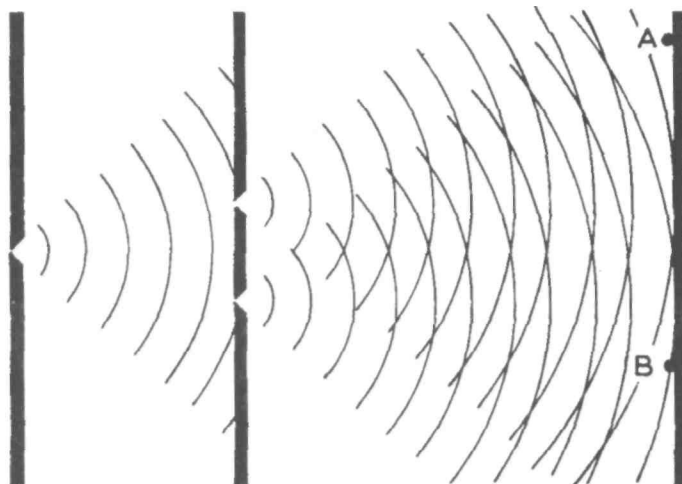
Ryc. 8.4. O tym, którą i dokąd dana „cząstka” biegnie, decydują „fale prawdopodobieństwa”, które interferują dokładnie w taki sam sposób jak fale na wodzie (por. ryc. 1.3)

Następny krok jest zatem oczywisty. Wyobraźmy sobie teraz takie same doświadczenia przeprowadzone ze światłem i z elektronami. Eksperyment z dwiema szczelinami był oczywiście wielokrotnie przeprowadzony przy użyciu światła, za każdym razem wytwarzając obraz interferencyjny dokładnie taki jak w przypadku fal na wodzie. W przypadku elektronów pojawiły się problemy ze skonstruowaniem układu w dostatecznie małej skali, ale wykonano równoważne doświadczenia, w których wiązkę elektronów rozpraszało na atomach w kryształach. Aby pozostać przy naszej prostej konwencji z dwiema szczelinami, będziemy jednakże nadal rozumować w tym języku, tłumacząc nań jednoznaczne wyniki rzeczywistych eksperymentów elektronowych. Podobnie jak światło także elektrony powodują powstawanie obrazów interferencyjnych.

Co z tego wszystkiego wynika? Czy to nie jest właśnie dualizm cząstkowo-falowy, do którego już się przyzwyczailiśmy? Tak, ale w istocie przyzwyczailiśmy się do niego tylko w tym sensie, że rozumiemy przepisy z kwantowej książki kucharskiej, nie zastanawiając się nad głębszymi implikacjami. Teraz nadszedł czas, aby to nadrobić. Funkcja Ψ , czyli zmienna w równaniu Schrödingera, w jakiś sposób opisuje elektron (czy jakkolwiek inną cząstkę). Jeżeli Ψ jest falą, to nic dziwnego, że ulega dyfrakcji i tworzy obraz interferencyjny; łatwo pokazać, że Ψ zachowuje się

jak amplituda fali, a Ψ^2 jak natężenie⁷⁶. Obraz interferencyjny w elektronowym doświadczeniu z dwiema szczelinami odpowiada rozkładowi Ψ^2 na ekranie. Jeżeli w wiązce mamy wiele elektronów, interpretacja jest prosta: Ψ^2 reprezentuje prawdopodobieństwo znalezienia elektronu w jakimś określonym miejscu. Tysiące elektronów pędzi przez oba otwory, ich trajektorię, a więc i miejsce, w którym padają na ekran, można przewidzieć na podstawie statystycznej interpretacji funkcji falowej Ψ - wielkiego osiągnięcia Borna w kuchni kwantowej. Co się jednak dzieje z pojedynczym elektronem?

W przypadku zwykłej fali, na przykład na wodzie, łatwo jest wyobrazić sobie przejście fali przez oba otwory w ścianie, gdyż fala jest ze swej natury czymś rozciąglą. Jednak elektron nadal wydaje się cząstką, pomimo skojarzonych z nim własności falowych, w związku z czym skłonni jesteśmy sądzić, że elektron musi przejść albo przez jeden, albo przez drugi otwór. Możemy poeksperymentować z zasłanianiem jednego otworu - wówczas otrzymamy zwykły obraz odpowiadający doświadczeniom z jedną szczeliną. Gdy jednak odsłonimy obie szczeliny, obraz nie będzie sumą dwóch obrazów z pojedynczymi szczelinami, tak jak to było w przypadku z kulami z karabinu maszynowego. Zamiast tego otrzymamy obraz interferencyjny tak jak w doświadczeniu z falami. Będzie on występował także wtedy, gdy osłabimy nasze działo elektronowe do tego stopnia, że tylko jeden elektron będzie przechodził przez całą aparaturę. Wydaje nam się, że pojedynczy elektron przechodzi przez jeden otwór, wpada do detektora, potem następny i następny, i tak dalej. Jeśli cierpliwie poczekamy, aż dostateczna liczba elektronów przejdzie przez szczeliny, na ekranie stopniowo utworzy się taki sam obraz jak w przypadku interferencji fal.



Ryc. 8.5. Aby określić prawdopodobieństwo pojawienia się elektronu w punkcie A lub B, musimy posłużyć się mechanizmem ruchu falowego. Jednak w punkcie A lub B na ekranie pojawia się (lub nie) elektron - cząstka, a nie fala.

Nie możemy powiedzieć co elektron „robi” w trakcie swej podróży przez układ doświadczalny

W gruncie rzeczy zarówno dla fotonów, jak i dla elektronów moglibyśmy wykonać tysiąc identycznych eksperymentów w tysiącu różnych laboratoriów, przepuszczając przez szczeliny tylko jeden elektron w każdym laboratorium, a następnie dodając tysiąc rezultatów - i dostalibyśmy taki sam interferencyjny rozkład, jak w przypadku tysiąca elektronów przechodzących przez tę samą

⁷⁶ Por. przypis na s. 115 (przyp. tłum.).

aparaturę. Pojedynczy elektron albo pojedynczy foton w drodze przez otwór zachowuje się zgodnie z prawami statystycznymi, które są słuszne tylko wtedy, gdy elektron „wie”, czy drugi otwór jest otwarty czy nie. To jest główna tajemnica kwantowego świata.

Jeśli spróbujemy oszukiwać - zamykając lub otwierając jedną ze szczelin w chwili, gdy elektron jest w trakcie podróży przez układ - nie uda nam się: obraz na ekranie jest zawsze „właściwy” dla stanu szczelin w momencie przejścia elektronu przez płaszczyznę szczelin. Jeśli spróbujemy podglądać, aby „zobaczyć”, przez którą szczelinę elektron przechodzi, wynik będzie jeszcze bardziej nieoczekiwany. Gdy wykona się eksperyment elektronowy, w którym układ rozróżnia i rejestruje, przez którą szczelinę przechodzi elektron, ale pozwala się mu przejść i podążać w stronę detektorów na ekranie, elektrony zachowują się jak normalne, zwykłe, przyzwoite cząstki. Zawsze widzimy je przechodzące przez jeden z dwóch otworów, nigdy przez oba równocześnie, a obraz powstający na ekranie dokładnie odpowiada temu, który widzieliśmy w doświadczeniu z kulami z karabinu, bez śladu interferencji. Elektrony nie tylko wiedzą, czy otwarte są obie szczeliny, czy tylko jedna. Wiedzą także, czy je obserwujemy i dostosowują do tego swoje zachowanie. Nie ma lepszego przykładu na oddziaływanie obserwatora z układem eksperymentalnym. Gdy próbujemy popatrzeć na rozpiętą w przestrzeni funkcję falową elektronu, zapada się ona w określoną cząstkę, ale gdy nie patrzymy, elektron zostawia sobie swobodę wyboru. W kategoriach prawdopodobieństw Borna wykonanie pomiaru zmusza elektron do wybrania jednej określonej drogi spośród wielu możliwości. Istnieje określone prawdopodobieństwo, że elektron przejdzie przez jedną ze szczelin i równoważne prawdopodobieństwo, że przejdzie przez drugą szczelinę; interferencja tych prawdopodobieństw daje obraz interferencyjny na ekranie (lub w detektorze). Kiedy jednak rejestrujemy przejście elektronu przez jedną ze szczelin, musi on znaleźć się w określonym miejscu układu, co zmienia rozkład prawdopodobieństwa dla jego dalszych losów, gdyż od tego momentu wiadomo, przez który otwór przeszedł. Jeżeli nikt nie patrzy, sama natura nie wie, przez którą szczelinę elektron przechodzi.

Kolaps funkcji falowej

Dostajemy to, co widzimy. Obserwacja eksperymentalna ma sens tylko w kontekście eksperymentu i nie może pomóc w wykryciu szczegółów, których nie obserwujemy. Możemy powiedzieć, że doświadczenie z dwiema szczelinami jest dowodem na to, że mamy do czynienia z falami. Podobnie, patrząc jedynie na ekran, można wywnioskować, że w układzie są dwie szczeliny, a nie jedna. Istotna jest, całość - i aparatura, i elektrony, i obserwator są częściami układu. Nie możemy określić, przez którą szczelinę przeszedł elektron, nie patrząc na szczeliny w odpowiednim momencie - fakt obserwowania szczelin decyduje o tym, że faktycznie wykonujemy inny rodzaj eksperymentu. Elektron opuszcza dział, dociera do detektora i wydaje się posiadać informację o całości układu eksperymentalnego, łącznie z obserwatorem. Jak powiedział Feynman w swojej telewizyjnej audycji w 1965 roku, jeżeli mamy aparaturę zdolną do określenia, przez który otwór przechodzi elektron, to możemy stwierdzić, że przechodzi przez jedną z nich albo przez drugą. Jeżeli jednak aparatura nie ma możliwości wykrycia, przez którą szczelinę coś przechodzi,

to w ogóle nie możemy powiedzieć, że przechodzi przez którąś z nich. „Jeżeli nie patrzymy, to stwierdzenie, że elektron przechodzi przez jedną szczelinę albo przez drugą, jest błędne”, mówi Feynman. Określenie „holistyczny” jest tak nadużywane, że waham się przed jego wprowadzeniem, ale nie istnieje inne słowo, które lepiej opisywałoby ten aspekt świata kwantów. On jest holistyczny; części są w jakimś sensie w kontakcie z całością i to nie oznacza tylko całości układu eksperymentalnego. Wydaje się, że świat próbuje jak najdłużej zachowywać wszystkie swoje opcje, wszystkie możliwości wyboru. Najdziwniejsze w kopenhaskiej interpretacji mechaniki kwantowej jest to, że sam akt obserwacji układu zmusza go do wyboru jednej z możliwości, która w tym momencie urzeczywistnia się.

W najprostszym doświadczeniu z dwiema szczelinami interferencję prawdopodobieństw można zinterpretować tak, jakby opuszczający działo elektron zniknął i był zastępowany przez zbiór elektronów widm, z których każde podąża inną drogą w stronę ekranu z detektorami. Widma interferują ze sobą nawzajem i na ekranie znajdujemy ślady tej interferencji, nawet gdy mamy do czynienia tylko z jednym „prawdziwym” elektronem. Jednakże ten zbiór widm opisuje całe zjawisko tylko wtedy, gdy nie patrzymy na szczeliny; w przeciwnym razie wszystkie widma znikają, oprócz jednego, które materializuje się jako rzeczywisty elektron. W kategoriach równania falowego Schrödingera każde „widmo” odpowiada fali, a raczej pakietowi falowemu interpretowanemu przez Borna jako miara prawdopodobieństwa. Obserwacja, która urzeczywistnia jedno widmo spośród wszystkich potencjalnych elektronów, jest w kategoriach mechaniki falowej równoważna zniknięciu całego zbioru fal prawdopodobieństwa, z wyjątkiem jednego pakietu falowego reprezentującego zmaterializowany w ten sposób elektron. W terminologii interpretacji kopenhaskiej nazywa się to kolapsem funkcji falowej i chociaż wydaje się bardzo dziwaczne, jest kwintesencją tej interpretacji, która z kolei stanowi podstawę całej kuchni kwantowej. Jest bardzo wątpliwe, czy liczne rzesze fizyków, elektroników i innych beztróskich użytkowników kwantowych przepisów kucharskich doceniają fakt, że reguły, które tak dobrze się sprawdzają w projektowaniu laserów i komputerów, a także w badaniach genetycznych, opierają się bezpośrednio na założeniu, że miriady widmowych cząstek interferują nawzajem przez cały czas, łącząc się w pojedynczą rzeczywistą cząstkę tylko wtedy, gdy funkcja falowa zapada się w trakcie obserwacji. Co gorsza, gdy tylko przestajemy patrzeć na elektron, lub jakikolwiek inny obiekt, na który patrzymy, natychmiast rozdziela się on na nowy zestaw widmowych cząstek, z których każda wybiera własną ścieżkę przez kwantowy świat. Nic nie jest rzeczywiste, jeżeli nie patrzymy, i przestaje być rzeczywiste, gdy tylko przestajemy patrzeć.

Być może ludzie, którzy tak ochoczo używają na co dzień kwantowej książki kucharskiej, swą pewność czerpią z prostoty równań matematycznych. Feynman bardzo prosto wyjaśnia podstawowe reguły. „Zdarzenie” w mechanice kwantowej jest zbiorem warunków początkowych i końcowych, niczym mniej i niczym więcej. Elektron opuszcza działo po jednej stronie aparatury i elektron trafia na konkretny detektor po drugiej stronie przeszkody z otworami. To jest zdarzenie. Prawdopodobieństwo zdarzenia jest dane przez kwadrat liczby będącej w gruncie rzeczy funkcją

falową Ψ Schrödingera. Jeżeli zdarzenie może zajść na więcej sposobów niż jeden (obie szczeliny są otwarte), to prawdopodobieństwo każdego możliwego rezultatu (prawdopodobieństwo, że elektron wpadnie do określonego detektora) jest dane przez kwadrat sumy wszystkich Ψ i pojawia się interferencja. Jednak gdy przeprowadzamy pomiar stwierdzający, która z możliwości rzeczywiście wystąpiła (patrzmy, przez którą szczelinę elektron przechodzi), rozkład prawdopodobieństwa jest tylko sumą kwadratów poszczególnych Ψ i czynnik interferencyjny znika - funkcja falowa zapada się.

Z fizycznego punktu widzenia są to zjawiska „nierealne”, ale równania matematyczne są proste i jasne dla każdego fizyka. Jeżeli tylko nie pytamy, co one znaczą, nie ma problemu. Zapytajmy jednak dlaczego świat musi być taki, jaki jest, a nawet Feynman odpowie: „Nie mam pojęcia”. Upierajmy się przy pytaniach o fizyczny obraz zdarzeń a wszystkie fizyczne obrazy rozmyją się w widmowy świat, w którym cząstki tylko wtedy wydają się rzeczywiste, gdy na nie patrzymy, i nawet takie własności, jak położenie czy pęd są tylko artefaktami, wytworami naszej wyobraźni. Nie ma się co dziwić, że wielu uznanych fizyków, łącznie z Einsteinem, spędziło dziesiątki lat na próbach znalezienia sposobu obejścia tej interpretacji mechaniki kwantowej. Ich wysiłki, które w skrócie opiszemy w następnym rozdziale, spełzły na niczym, a wszystkie nowe nieudane próby obalenia interpretacji kopenhaskiej przyczyniły się do wzmocnienia podstaw tego widmowego świata prawdopodobieństw, torując drogę do wyjścia poza mechanikę kwantową i stworzenia nowego obrazu holistycznego wszechświata. Podstawą tego nowego podejścia jest ostateczne sformułowanie pojęcia komplementarności, ale zanim będziemy mogli przyjrzeć się jego implikacjom, mamy jeszcze jeden problem do rozwiązania.

Reguły komplementarności

Ogólna teoria względności i mechanika kwantowa są zwykle przedstawiane jako dwa bliźniacze triumfy dwudziestowiecznej nauki, a prawdziwa unifikacja ich obu w jedną uniwersalną teorię jest świętym Graalem współczesnej fizyki. Wysiłki fizyków, jak się wkrótce przekonamy, z całą pewnością dają głębokie zrozumienie natury świata, ale wydają się nie uwzględniać faktu, że te dwa opisy świata mogą w ścisłym sensie być nie do pogodzenia ze sobą.

Jeszcze w 1927 roku, w swojej pierwszej prezentacji tego, co później stało się znane jako interpretacja kopenhaska, Bohr podkreślił kontrast między opisem świata w kategoriach dokładnych współrzędnych przestrzenno-czasowych i absolutnej przyczynowości a obrazem kwantowym, gdzie obserwator interferuje z obserwowanym przez siebie układem i jest jego integralną częścią. Współrzędne w przestrzeni i w czasie reprezentują położenie, przyczynowość opiera się na dokładnej wiedzy o tym, co dokąd zmierza, zasadniczo na znajomości pędu. Klasyczne teorie zakładają, że możemy równocześnie poznać jedno i drugie; mechanika kwantowa mówi nam, że za dokładną znajomość współrzędnych przestrzenno-czasowych musimy zapłacić niepewnością co do pędu, czyli przyczynowości. Ogólna teoria względności jest w tym sensie teorią klasyczną i nie może być uważana za równie fundamentalny opis świata jak mechanika kwantowa. Jeżeli kiedykolwiek znajdziemy sprzeczność między nimi, to punktem odniesienia, do którego

będziemy zmuszeni zwrócić się po najbardziej podstawowy opis otaczającego nas wszechświata będzie mechanika kwantowa.

Czym w istocie jest wszechświat? Bohr sugerował, że sama idea jedynego „świata” może być myląca i zaproponował inną interpretację doświadczenia z dwiema szczelinami. Nawet w tym prostym doświadczeniu istnieje oczywiście bardzo wiele dróg, które elektron lub foton może wybrać poprzez każdą z dwóch szczelin. Dla prostoty założmy jednak, że są tylko dwie możliwości, że cząstka przechodzi przez otwór *A* lub przez otwór *B*. Bohr mówi, że możemy uważać każdą z tych dwóch możliwości za realizację innego świata. W jednym świecie cząstka przechodzi przez otwór *A*, w innym przez otwór *B*. Rzeczywisty świat, którego doświadczamy, nie jest jednak żadnym z tych prostych światów. Nasz świat jest hybrydą, kombinacją dwóch możliwych światów odpowiadających dwom trajektoriom cząstki i oba te światy interferują ze sobą. Jeżeli obserwujemy, przez którą szczelinę cząstka przejdzie, to mamy tylko jeden świat, ponieważ wyeliminowaliśmy drugą możliwość i w tym wypadku nie ma interferencji. Z równań kwantowych Bohr wyczarował nie tylko widmowe elektrony, ale całe widmowe rzeczywistości, widmowe światy, które istnieją tylko wtedy, gdy na nie nie patrzymy. Wyobraźmy sobie teraz ten prosty przykład przełożony z układu dwóch światów, połączonych przez dwuszczelinowy eksperyment, na miriady widmowych rzeczywistości odpowiadających miriadom sposobów, które każdy układ kwantowy we wszechświecie może „wybrać”: każda możliwa funkcja falowa każdej cząstki; każda dopuszczalna wartość liczby q Diraca. Dodajmy do tego zagadkowy fakt, że elektron w otworze *A* wie, czy otwór *B* jest otwarty i że w zasadzie zna on kwantowy stan całego wszechświata, a łatwo przyjdzie nam zrozumieć poruszenie, jakie interpretacja kopenhaska wywołała wśród ekspertów, którzy zdawali sobie sprawę z jej najgłębszych konsekwencji. Podczas gdy część z nich energicznie atakowała fundamenty teorii, a równie liczna grupa, aczkolwiek także poruszona implikacjami teorii, odpierała zarzuty, zwykli śmiertelnicy radośnie ruszyli do kwantowej kuchni, kolapsując funkcje falowe i przekształcać świat i otoczenie wokół siebie.

Rozdział dziewiąty

Paradoksy i możliwości

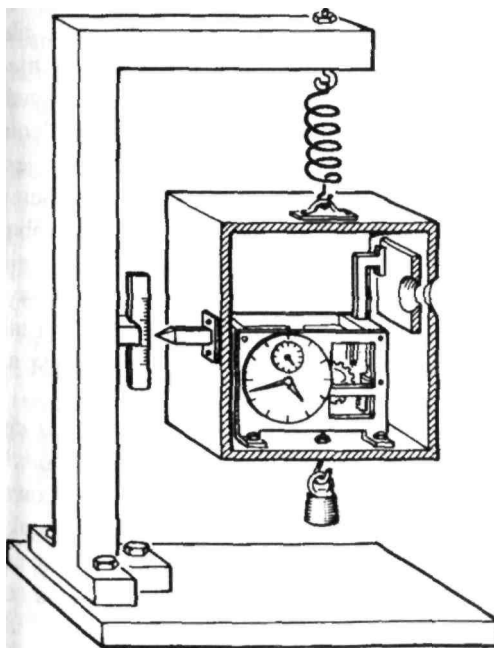
Każdy atak na interpretację kopenhaską wzmacnia jej pozycję. Gdy myśliciele formatu Einsteina próbują znaleźć usterki w teorii, a obrońcom udaje się stworzyć kontrargumenty i teoria broni się, siłą rzeczy staje się ona bardziej wiarygodna. Interpretacja kopenhaska jest z całą pewnością „słuszna” w tym sensie, że dobrze funkcjonuje; każda inna interpretacja kwantowych reguł musi uwzględniać wersję kopenhaską jako funkcjonujący model, który pozwala eksperymentatorom przewidywać wyniki ich doświadczeń - przynajmniej w sensie statystycznym - a inżynierom umożliwia projektowanie laserów, komputerów i innych urządzeń. Nie ma sensu powtarzać wszystkich celnych argumentów, za pomocą których odrzucono kontrpropozycje - zadanie to zostało rzetelnie wykonane przez innych. Godna wzmianki jest chyba jednak najcelniejsza uwaga, poczyniona przez Heisenberga w 1958 roku w jego książce *Physics and Philosophy*, w której stwierdza on, że wszystkie kontrpropozycje „muszą zrezygnować z zasadniczej symetrii teorii kwantowej (na przykład symetrii między falą a cząstką lub między położeniem a prędkością). Równie dobrze można by powiedzieć, że interpretacji kopenhaskiej nie da się uniknąć, jeżeli te własności symetrii [...] okażą się pierwotną cechą natury; każdy dotychczasowy eksperyment podtrzymuje ten pogląd”.

Istnieje ulepszona wersja interpretacji kopenhaskiej (ani nie będąca kontrpropozycją, ani nie pozostająca w sprzeczności ze standardową teorią), która zawiera tę zasadniczą symetrię - poznamy ją w rozdziale jedenastym. Nie należy się dziwić, że Heisenberg nie wspomniał o niej w swojej książce, gdyż akurat w tym czasie, około roku 1958, nowa wersja była dopiero rozwijana przez pewnego doktoranta w Stanach Zjednoczonych. Zanim do tego przejdziemy, wybierzemy się tropem pewnego wątku ewolucji teorii i doświadczenia, którego kulminacja w 1982 roku wykazała ponad wszelką wątpliwość, że interpretacja kopenhaska stanowi poprawny model rzeczywistości kwantowej. Opowieść - jedna z najbarwniejszych w historii fizyki - zaczyna się od Einsteina, a kończy ponad pięćdziesiąt lat później w laboratorium fizycznym w Paryżu.

Zegar w pudle

Wielka debata na temat interpretacji teorii kwantowej pomiędzy Bohrem a Einsteinem rozpoczęła się w 1927 roku na V Kongresie SoWaya i trwała aż do śmierci Einsteina w 1955 roku. Einstein korespondował „a ten temat także z Bornem, pewien pogląd na charakter tej debaty dają ich listy, opublikowane w formie książkowej jako *The Born-Einstein Letters*. Dyskusja zaczęła się od serii wymyślonych testów dotyczących przewidywań interpretacji kopenhaskiej - nie były to prawdziwe doświadczenia laboratoryjne, lecz „eksperymenty myślowe”. Zabawa polegała na tym, że Einstein próbował wymyślić doświadczenie, w którym byłoby teoretycznie możliwe zmierzenie dwóch komplementarnych własności równocześnie, na przykład położenia i masy lub energii cząstki w ściśle określonym momencie i tak dalej. Następnie Bohr i Born próbowali udowodnić, że

eksperymentu myślowego Einsteina nie da się przeprowadzić tak, aby rzeczywiście podważyć założenia teorii. Za ilustrację owej zabawy posłuży nam jeden z przykładów - zegar w pudle.



Ryc. 9.1. Doświadczenie z „zegarem w pudle”. Techniczne szczegóły konstrukcyjne (odważniki, sprężyny itd.) uniemożliwiają uwolnienie równoczesnego pomiaru energii i czasu od kwantowej nieoznaczoności (por. opis w tekście)

Wyobraźmy sobie pudło, powiada Einstein, w którego ścianie zrobiony jest otwór przykryty przesłoną. Przesłona jest sterowana przez zegar znajdujący się wewnątrz pudła i może być przezeń otwierana i zamykana. Oprócz zegara i mechanizmu przesłony pudełko wypełnia promieniowanie. Ustawmy zegar w ten sposób, że w pewnym określonym, z góry zadanim momencie przesłona się otworzy, wypuści dokładnie jeden foton i ponownie się zamknie. Zważmy pudło, poczekajmy, aż foton ucieknie i zważmy pudło ponownie. Masa jest równoważna energii, więc różnica dwóch pomiarów wagi daje nam energię fotonu, któremu pozwoliliśmy uciec. Tak więc w zasadzie znamy dokładnie i energię fotonu, i moment czasowy, w którym foton przeszedł przez przesłonę, co jest sprzeczne z zasadą nieoznaczoności.

Jak zawsze w tych dyskusjach ostatnie słowo należało do Bohra, który szczegółowo przeanalizował ewentualną praktyczną realizację propozycji Einsteina. Pudło musi być zważone, więc musi na przykład zostać zawieszona na sprężynie w polu grawitacyjnym. Zanim foton opuści pudło, hipotetyczny eksperymentator odczytuje pozycję zamocowanego do ściany pudła wskaźnika względem nieruchomej skali. Po ucieczce fotonu eksperymentator może w zasadzie dołożyć do pudła odważniki, aby przywrócić wskaźnikowi pierwotne położenie, ale w tym momencie pojawiają się ograniczenia związane z zasadą nieoznaczoności. Położenie wskaźnika może być wyznaczone w granicach określonych przez relacje Heisenberga, a z niepewnością określenia położenia wiąże się niepewność określenia pędu pudła. Im większa jest dokładność pomiaru wagi pudła, tym większa niepewność określenia jego pędu, którego znajomość jest równie istotna. Nawet jeśli spróbujemy doprowadzić wskaźnik położenia do jego pierwotnej pozycji, dokładając małe odważniki odpowiednio rozciągające sprężynę i wyznaczmy energię fotonu,

mierząc dodany w ten sposób ciężar, to i tak nie uda nam się uzyskać dokładniejszych wyników, niż pozwalają na to relacje Heisenberga, w tym wypadku $\Delta E \Delta T > \psi$.

Szczegóły tego i innych eksperymentów myślowych związanych z debatą Einsteina i Bohra można znaleźć w książce Abrahama Paisa *Subtle is the Lord...* Pais podkreśla, że dążenia Bohra do pełnej i szczegółowej analizy eksperymentów myślowych bynajmniej nie należy traktować jako czystej przekory. W powyższym przykładzie właśnie szczegóły praktycznej realizacji eksperymentu decydują o wyniku - ciężkie nity mocujące ramę wagi, sprężyna, która z jednej strony pozwala zważyć pudło, ale z drugiej pozwala mu się poruszać, małe odważniki, które trzeba dodać i tak dalej. Wyniki wszystkich doświadczeń muszą być analizowane w kategoriach klasycznego języka, języka codziennej rzeczywistości. Gdybyśmy umocowali pudło na sztywno, aby usunąć niepewność związaną z jego położeniem, to utracilibyśmy możliwość zważenia go po ucieczce fotonu. Dylemat związany z kwantową nieokreślonością powstaje dlatego, że próbujemy wyrazić kwantowe pojęcia w codziennym języku, i z tego powodu Bohr upierał się przy bolcach i nitach.

Paradoks EPR

Einstein uznał rację Bohra w dyskusji o eksperymencie z pudłem, a także o kilku innych podobnych eksperymentach myślowych i na początku lat trzydziestych wymyślił inny rodzaj wymyślanego testu reguł kwantowych. Ten nowy pomysł wykorzystywał doświadczalną informację o jednej cząstce do wydedukowania własności - na przykład położenia i pędu - drugiej cząstki. Ten etap dyskusji nie został rozstrzygnięty za życia Einsteina, ale rzeczywisty - nie myślowy - eksperyment został niedawno przeprowadzony i raz jeszcze wygrał Bohr.

Na początku lat trzydziestych wiele się zdarzyło w prywatnym życiu Einsteina. Najpierw musiał opuścić Niemcy ze względu na zagrożenie ze strony nazistów. W 1935 roku osiadł w Princeton, a w grudniu 1936 roku zmarła po długiej chorobie jego druga żona, Elsa. Pomimo to Einstein nie przestał rozmyślać o interpretacji teorii kwantowej - pokonany przez Bohra, ale w głębi serca nie był przekonany, że interpretacja kopenhaska, ze swoją immanentną nieoznaczonością i brakiem ścisłej przyczynowości, miałyby definitywnie opisywać świat. W książce *The Philosophy of Quantum Mechanics* Max Jammer wyczerpująco przedstawił rozmaite zwroty i meandry rozważań Einsteina na ten temat. Kilka spośród tych wątków zbiegło się w 1935 i 1936 roku, gdy Einstein pracował wspólnie z Borisem Podolskim i Nathanem Rosenem nad publikacją, w której przedstawili argumentację znaną obecnie pod nazwą paradoksu EPR, który zresztą wcale nie jest paradoksem w ścisłym tego słowa znaczeniu⁷⁷.

Sedno sprawy, zdaniem Einsteina i jego współpracowników, polega na tym, że interpretacja kopenhaska jest niekompletna - że rzeczywiście istnieje jakiś ukryty mechanizm, który napędza wszechświat, a na zewnątrz, na poziomie kwantowym, daje złudzenie niepewności i nieokreśloności, poprzez statystyczne fluktuacje.

⁷⁷ A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?* [Czy kwantowo-mechaniczny opis fizycznej rzeczywistości może być uważany za kompletny?], „Physical Review”, 1936, t. 47, s. 777-780. Publikacja ta jest ujęta wśród przedruków wydanych łącznie w 1970 roku przez wydawnictwo Harper & Row, pod redakcją S. Toulmina.

Wyobraźmy sobie, mówią Einstein, Podolsky i Rosen, dwie cząstki które oddziałują ze sobą, a następnie rozbiegają się w przeciwnie strony, nie oddziałując z niczym innym, dopóki eksperymentator nie zdecyduje się zbadać jednej z nich. Każda z cząstek ma swój własny pęd i każda znajduje się w określonym miejscu w przestrzeni. Nawet w ramach reguł teorii kwantowej możemy dokładnie zmierzyć całkowity, sumaryczny pęd obu cząstek oraz odległość między nimi w chwili, gdy są jeszcze blisko siebie. Gdy znacznie później zdecydujemy się zmierzyć pęd jednej z cząstek, automatycznie wiemy, jaki jest pęd drugiej, ponieważ całkowity pęd nie może ulec zmianie. Równie dobrze moglibyśmy dokładnie zmierzyć położenie pierwszej cząstki i na tej samej zasadzie wydedukować położenie drugiej. Widać więc, dokąd zmierza ta argumentacja - czym innym jest upierać się, że fizyczny pomiar pędu cząstki A niszczy wiedzę o jej własnym położeniu (czyli nie możemy poznać jej dokładnego położenia) i podobnie fizyczny pomiar położenia cząstki A zaburza jej pęd, który staje się nieokreślony, a czym innym powiedzieć, że stan cząstki B zależy od tego, który z dwóch pomiarów zdecydujemy się wykonać na cząstce A. W jaki sposób cząstka B mogłaby „wiedzieć”, czy powinna mieć dokładnie określony pęd czy dokładnie określone położenie? Wydawało się, że w kwantowym świecie fakt wykonania pomiaru na cząstce tutaj, wpływa na jej partnera tam, w niezgodzie z zasadą przyczynowości. Ta natychmiastowa „komunikacja” w przestrzeni jest zwana oddziaływaniem na odległość.

Jeżeli akceptujemy interpretację kopenhaską, to, według publikacji EPR, godzimy się z faktem, że „realność [położenia i pędu w drugim układzie] zależy od procesu pomiaru przeprowadzonego w pierwszym układzie, który w żaden sposób nie zaburza drugiego układu. Nie można się spodziewać, że jakakolwiek rozsądna definicja realności pozwoli na coś takiego”⁷⁸. W tym miejscu poglądy autorów EPR są sprzeczne z poglądami większości ich kolegów i całej szkoły kopenhaskiej. Nikt nie kwestionuje logiki ich argumentów, ale nie ma zgody co do tego, co stanowi „rozsądną” definicję realizmu. Bohr i jego koledzy zgodzili się żyć w świecie, w którym położenie i pęd drugiej cząstki nie mają obiektywnego znaczenia, dopóki się ich nie zmierzy, niezależnie od tego, co się uczyni z pierwszą cząstką. Nie ma wątpliwości, że musimy dokonać wyboru między światem obiektywnego realizmu a światem kwantów. Einstein pozostał w bardzo nielicznej mniejszości, decydując się trwać przy obiektywnym realizmie i odrzucając interpretację kopenhaską.

Jednak Einstein był obiektywnym i bezstronnym naukowcem, zawsze gotowym zaakceptować solidne dowody doświadczalne. Gdyby żył dzisiaj, z całą pewnością przekonałby go niedawno przeprowadzony eksperyment będący odpowiednikiem efektu EPR. Obiektywna rzeczywistość nie istnieje w fundamentalnym opisie wszechświata, istnieje natomiast działanie na odległość czy też brak przyczynowości. Doświadczalna weryfikacja tego faktu jest tak ważna, że zasługuje na osobny rozdział, ale najpierw, aby zamknąć jeden wątek, zajmiemy się niektórymi innymi paradoksalnymi możliwościami wynikającymi z reguł kwantowych, a mianowicie cząstkami poruszającymi się wstecz w czasie oraz, na koniec, na wpół żywym kotem Schrödingera.

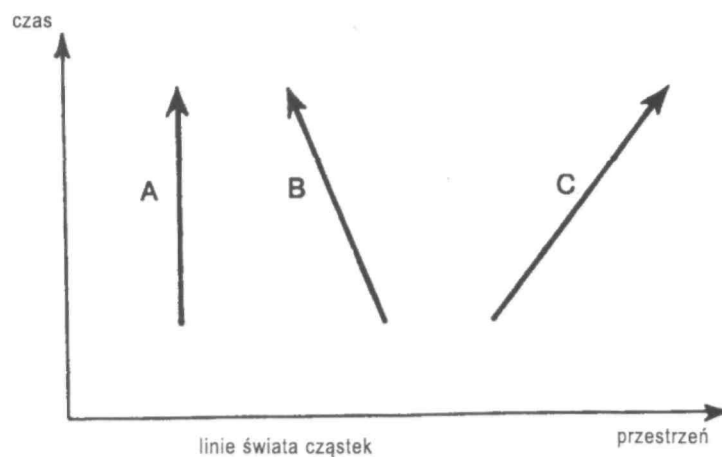
⁷⁸ A. Pais, *Subtle is the Lord...*, s. 456.

Podróże w czasie

Fizycy często używają prostej notacji rysunkowej, aby na kawałku papieru bądź na tablicy opisać ruch cząstek w przestrzeni i w czasie. Upływ czasu jestznaczony w kierunku od dołu do góry, natomiast ruch w przestrzeni w poprzek strony. To wprawdzie redukuje trzy wymiary przestrzenne do jednego, ale daje obraz znany każdemu, kto miał kiedykolwiek do czynienia z wykresami, gdzie czas odpowiada osi y , a przestrzeń osi x . Te diagramy przestrzenno-czasowe pojawiły się po raz pierwszy w teorii względności i okazały się nieocenionym narzędziem nowoczesnej fizyki, gdyż za ich pomocą można graficznie przedstawić wiele osobliwości równań Einsteina, które w postaci geometrycznej są klarowniejsze i często łatwiejsze do zrozumienia. Richard Feynman przeniósł je w latach czterdziestych do fizyki cząstek, w której są zwykle nazywane grafami Feynmana. W kontekście kwantowego świata reprezentacja przestrzenno-czasowa może być także zastąpiona przez opis w kategoriach pędu i energii, który jest bardziej przydatny, gdy ma się do czynienia ze zderzeniami cząstek, ale my pozostaniemy przy prostszym opisie przestrzenno-czasowym.

Droga elektronu przedstawiona jest na diagramie Feynmana jako linia. Elektron, który stoi w jednym miejscu i nie porusza się, daje linię skierowaną prosto do góry, co odpowiada ruchowi wyłącznie w wymiarze czasowym. Elektron, który powoli zmienia swoje położenie przestrzenne (niezależnie od tego, że poddaje się także ruchowi wzdłuż kierunku czasu), daje linię pod niewielkim kątem do pionu, a szybko poruszający się elektron tworzy większy kąt z „linią świata” nieruchomej cząstki. Ruch w przestrzeni może się odbywać w dowolnym kierunku, w lewo lub w prawo, a linia świata może „zygzakować”, jeżeli elektron zmienia kierunek ruchu pod wpływem zderzeń z innymi cząstkami. Jednak w zwykłym świecie albo w świecie prostych diagramów przestrzenno-czasowych teorii względności nikt się nie spodziewa, że linia świata mogłaby się odwrócić i zacząć zmierzać w dół strony, gdyż odpowiadałoby to ruchowi wstecz w czasie.

Pozostając przy elektronach w naszym przykładzie, narysujmy prosty diagram Feynmana odpowiadający elektronowi, który porusza się w przestrzeni (i w czasie), zderza się z fotonem i zmienia kierunek ruchu, a następnie emituje foton, który odrzuca go w jeszcze innym kierunku. Fotony są tak ważne w tym opisie zachowania cząstek, ponieważ działają one jako nośniki siły elektrycznej. Gdy dwa elektrony zbliżą się do siebie, elektryczna siła oddziaływania ich jednakowych ładunków spowoduje, że się odepchną i rozbiegną.



Ryc. 9.2. Ruch cząstki w czasie i w przestrzeni można przedstawić w formie „linii świata”

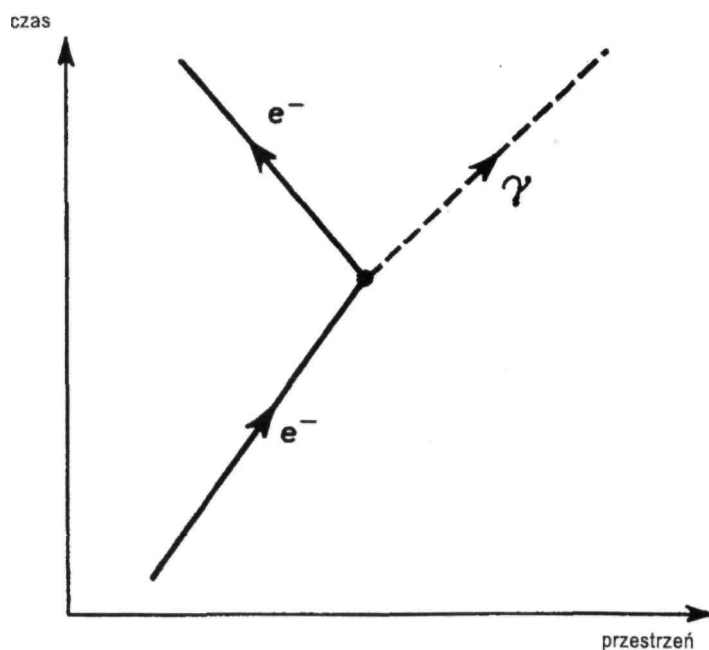
Na diagramie Feynmana opisującym to zdarzenie mamy dwie zbliżające się elektronowe linie świata, następnie foton opuszcza jeden z elektronów (odrzucając go w dal) i wpada na drugi (odrzucając go w innym kierunku)⁷⁹. Fotony są nośnikami pola elektrycznego, ale potrafią także robić inne rzeczy. Dirac pokazał, że obdarzony dostatecznie dużą energią foton może stworzyć parę elektron-pozytron, przekształcając swoją energię w ich masę. Pozytron (elektronowa „dziura” w morzu ujemnych energii) będzie żył krótko, ponieważ każde jego spotkanie z innym (lub tym samym) elektronem skończy się anihilacją ich obu, połączoną z powstaniem wysokoenergetycznego promieniowania (które dla ułatwienia możemy na diagramie przedstawić jako pojedynczy foton).

Całe to zdarzenie może być prosto przedstawione na diagramie Feynmana. Poruszający się foton spontanicznie tworzy parę elektron-pozytron; elektron rusza swoją drogą; pozytron napotyka inny elektron i znika; kolejny foton oddala się. Dramatyczne odkrycie, którego Feynman dokonał w 1949 roku, zasadza się na tym, że przestrzenno--czasowy opis pozytronu poruszającego się w przód w czasie jest matematycznie dokładnie równoważny opisowi elektronu poruszającemu się wstecz w czasie wzdłuż tej samej linii na diagramie Feynmana. Na dodatek okazuje się, że nie ma różnicy między fotonem poruszającym się wstecz i w przód w czasie, ponieważ fotony są swoimi własnymi antycząstkami. Z praktycznego punktu widzenia nic się nie zmieni, jeżeli usuniemy strzałki z linii fotonowych i odwrócimy je na liniach pozytronowych, zamieniając je w elektrony. Ten sam diagram Feynmana opowiada nam teraz inną historię. Elektron poruszający się w przestrzeni i w czasie spotyka foton o dużej energii, pochłania go, ulega odbiciu i porusza się wstecz w czasie dopóki nie wyemituje fotonu i nie zostanie odrzucony w taki sposób, że ponownie będzie się poruszał w przód w czasie. Zamiast trzech cząstek, dwóch elektronów i pozytronu w skomplikowanym tańcu, mamy jedną cząstkę, elektron - zygzakujący przez przestrzeń i czas - tu i ówdzie zderzający się z fotonami.

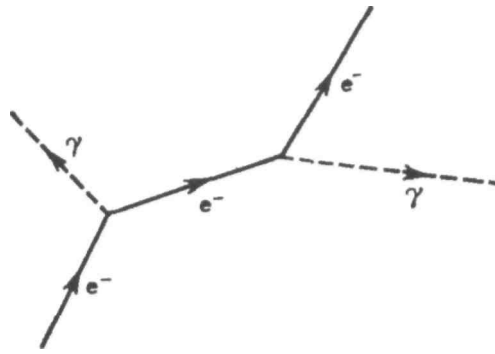
⁷⁹ Jest to oczywiście wielkie uproszczenie. Powinniśmy, rzecz jasna, wyobrażać sobie parę elektronów wymieniającą wiele fotonów w trakcie oddziaływania. Na tej samej zasadzie w dalszym ciągu tekstu będziemy mówić o fotonie tworzącym parę elektron-pozytron, podczas gdy w rzeczywistości mielibyśmy do czynienia z większą liczbą fotonów, na przykład ze zderzającą się parą promieni gamma lub jeszcze bardziej złożoną sytuacją.

W geometrycznym opisie za pomocą diagramów istnieje ewidentne podobieństwo pomiędzy przykładem, w którym elektron pochłania niskoenergetyczny foton i nieznacznie zmienia kierunek ruchu, a następnie emituje foton i ponownie zmienia kierunek, a sytuacją, w której oddziaływanie elektronu z fotonem jest tak potężne, że przez część swojego życia elektron porusza się wstecz w czasie. W obu wypadkach mamy na diagramie zygzakowatą linię z trzema prostymi odcinkami i dwoma załamaniem. Różnica polega na tym, że w drugim wypadku kąty załamania linii są ostrzejsze niż w pierwszym. John Wheeler pierwszy zasugerował, że oba zygzaki przedstawiają to samo zdarzenie, a Feynman wykazał ich matematyczną równoważność. Mamy tu do czynienia z większą liczbą problemów, niż by się wydawało na pierwszy rzut oka, więc kolejno się nimi zajmujemy.

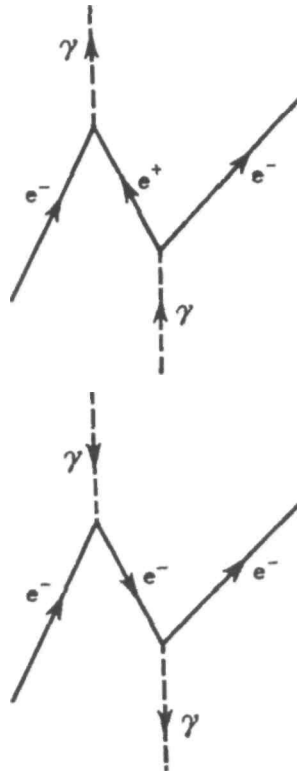
Po pierwsze, rzuciłem uwagę o fotonie, który jest swoją własną antycząstką, co pozwoliło nam usunąć strzałki z fotonowych linii świata. Foton poruszający się w przód w czasie jest równoważny antyfotonowi poruszającemu się wstecz w czasie, ale antyfoton jest fotonem, więc foton biegnący w przód w czasie jest tym samym co foton biegnący wstecz w czasie. Czy to nie wydaje się dziwne?



Ryc. 9.3. Elektron porusza się w czasoprzestrzeni, emituje foton (kwant promieniowania gamma) i na skutek odrzutu odbija się od dotychczasowej trajektorii

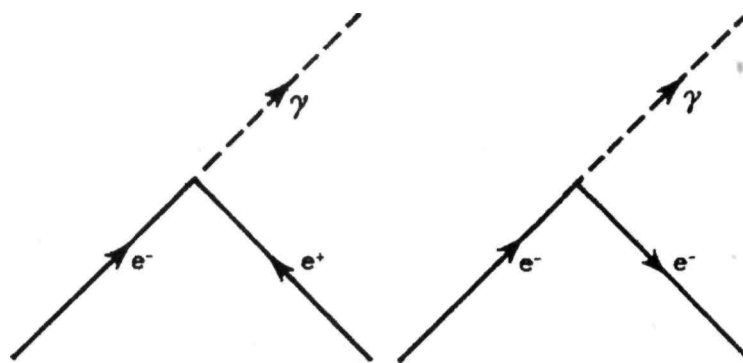


Ryc. 9.4. Zderzenia z fotonami - część historii życia elektronu

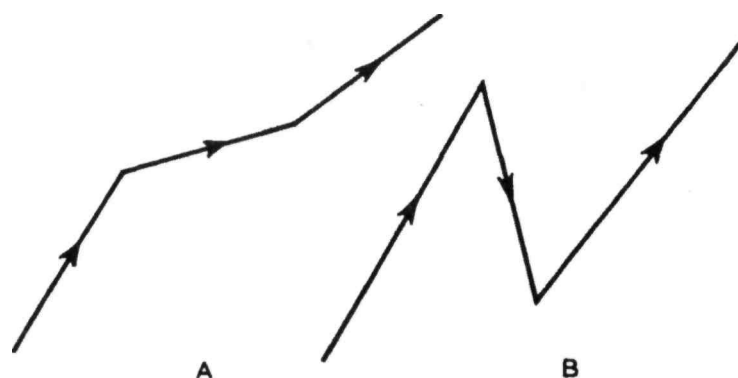


Ryc. 9.5. Po lewej - powstanie pary elektron-pozytron z kwantu gamma. Pozytron napotyka później inny elektron i ulega anihilacji, dając inny foton gamma. Po prawej - trajektoria pojedynczego elektronu tworzy zygzak w czasoprzestrzeni, w wyniku oddziaływania z dwoma fotonami, tak jak na ryc. 9.4. Część swego życia elektron spędza, poruszając się wstecz w czasie. Oba rysunki są matematycznie równoważne

Powinno. Niezależnie od innych konsekwencji oznacza to, że gdy widzimy wzbudzony atom, który emituje energię i spada do stanu podstawowego, możemy równie dobrze powiedzieć, że przejście to spowodowała energia elektromagnetyczna poruszająca się wstecz w czasie, która skumulowała się w atomie. Jest to trochę trudne do wyobrażenia, bo nie mówimy teraz o pojedynczym fotonie poruszającym się po linii prostej w przestrzeni, ale o powiększającej się sferycznej powłoce energii elektromagnetycznej - o froncie falowym rozchodzącym się od atomu we wszystkich kierunkach i ulegającym po drodze załamaniom i rozproszeniom. Jeżeli odwrócimy tę sytuację, powstanie obraz, w którym idealnie sferyczny front falowy ześrodkowany na naszym atomie musi zostać stworzony przez wszechświat z serii skoordynowanych ze sobą procesów rozpraszania tak zsynchronizowanych, aby spotkać się w tym konkretnym atomie.



Ryc. 9.6. Anihilacja pary cząstka-antycząstka może być opisana jako zjawisko rozpraszania, w którym cząstka zostaje odrzucona wstecz w czasie



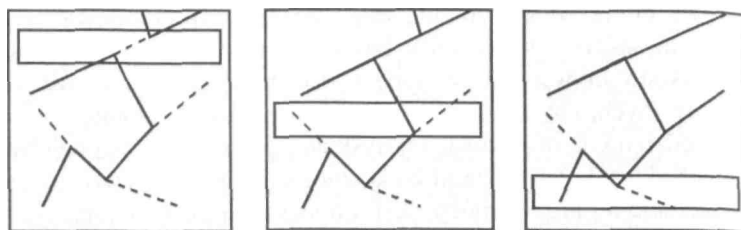
Ryc. 9.7. Richard Feynman udowodnił, że wszystkie diagramy przestrzenno-czasowe z podwójnym załamaniem są matematycznie równoważne

Nie będziemy kontynuować tej dyskusji, ponieważ odciągnęłoby nas to od teorii kwantowej w kierunku kosmologii, ale warto zwrócić uwagę na implikacje tej argumentacji, jeśli chodzi o nasze rozumienie czasu. Przede wszystkim powstaje pytanie, dlaczego postrzegamy czas jako płynący tylko w jednym kierunku. Promieniowanie wyemitowane przez atom w danym momencie jest absorbowane przez inne atomy później. Proste wytłumaczenie tego faktu opiera się na spostrzeżeniu, że większość tych atomów znajduje się w stanie podstawowym, co z kolei oznacza, że przyszłość wszechświata jest zimna. Asymetria, którą widzimy jako strzałkę czasu, jest asymetrią między zimniejszą a cieplejszą epoką w ewolucji wszechświata. Absorpcja fotonów w zimniejszej przyszłości jest łatwiejsza do zrealizowania, jeżeli wszechświat się rozszerza, ponieważ rozszerzanie samo w sobie jest przyczyną schładzania wszechświata. Nasz wszechświat rzeczywiście się rozszerza, co zapewne jest ściśle związane z naszym poczuciem upływu czasu⁸⁰.

⁸⁰ Te idee są szczegółowo przedstawione (w prostym, niematematycznym języku) w rozdziale szóstym książki Janyanta Narlikara *The Structure of the Universe*, wydanej przez Oxford University Press w 1977 roku [*Struktura wszechświata*, przeł. Adam Mazurkiewicz, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1985]. Paul Davies w wydanej w 1977 roku przez Cambridge University Press książce *Time in the Modern Universe* [Czas w nowoczesnym wszechświecie] podaje jeszcze więcej szczegółów; nieco matematyki można znaleźć w *The Ultimate Fate of the Universe* [Ostateczny los wszechświata] J.N. Islama (Cambridge University Press, 1983).

Czas u Einsteina

A co „widzi” foton jako strzałkę czasu? Wiemy z teorii względności, że poruszające się zegary idą wolniej - tym wolniej, im bardziej prędkość ruchu zegara jest zbliżona do prędkości światła. Przy prędkości równej prędkości światła czas się nie zmienia i zegar stoi. Fotony podróżują oczywiście z prędkością światła, co oznacza, że pojęcie czasu nie ma dla nich sensu. Zmierzony przez ziemskie zegary czas podróży fotonu, który wyruszył z odległej gwiazdy i przybył na Ziemię, może wynieść tysiące lat, ale samemu fotonowi nie zajęło to w ogóle czasu.



Ryc. 9.8. Gdyby trajektorie wszystkich cząstek były w jakiś sposób unieruchomione w czasoprzestrzeni, moglibyśmy potraktować naszą percepcję ruchu i zderzeń jako iluzję stworzoną przez przesuwający się w górę i w przód w czasie (od prawej do lewej na rycinie) wycinek globalnego diagramu. Czy to możliwe, że taniec cząstek jest tylko iluzją wywołaną przez nasze poczucie upływu czasu?

Foton kosmicznego promieniowania tła podróżował, według naszej miary, prawdopodobnie około 15 miliardów lat, od chwili gdy wszechświat powstał w wielkim wybuchu, ale z punktu widzenia samego fotonu wielki wybuch i nasza teraźniejszość to jedno i to samo. Linia świata fotonu na diagramie Feynmana nie ma strzałki nie tylko dlatego, że foton jest własną antycząstką, ale również dlatego, że ruch w czasie nie ma sensu dla fotonu - i właśnie to jest przyczyną, że jest on swoją antycząstką.

Mistycy i popularyzatorzy próbujący połączyć filozofię Wschodu z nowoczesną fizyką najwyraźniej przeoczyli fakt, że wszystko we wszechświecie - przeszłość, teraźniejszość i przyszłość - jest połączone przez sieć promieniowania elektromagnetycznego, która „widzi” równocześnie cały wszechświat. Fotony mogą być kreowane i unicestwiane, więc sieć nie jest kompletna. Istnieje linia świata fotonu w czasoprzestrzeni łącząca moje oko na przykład z Gwiazdą Polarną, ale linia ta nie rozwija się w czasie od gwiazdy do mojego oka - jej ewolucja w czasie to tylko moja własna percepcja. Z innego, całkowicie równoważnego punktu widzenia, można stwierdzić, że linia fotonu trwa wiecznie, a wszechświat dookoła się zmienia i w trakcie tych zmian w pewnym momencie moje oko i Gwiazda Polarna znajdują się na przeciwnych końcach linii.

A co z liniami innych cząstek na diagramach Feynmana? Do jakiego stopnia są one „realne”? Możemy na nie spojrzeć z tego samego punktu widzenia. Wyobraźmy sobie diagram Feynmana, który obejmuje cały wszechświat i cały czas oraz zawiera tory wszystkich cząstek. A teraz załóżmy, że patrzymy na ten diagram przez wąską szczelinę pozwalającą obserwować niewielki wycinek czasu, i przesuwamy szczelinę jednostajnie w górę kartki. Zauważymy zmieniającą się panoramę - skomplikowany taniec oddziałujących cząstek, produkcję par, anihilację i wiele innych

bardziej złożonych zdarzeń. Jednakże my przecież tylko skanujemy coś, co jest unieruchomione w czasie i w przestrzeni. Zmienia się nasza percepcja, a nie obserwowana przez nas rzeczywistość. Jesteśmy związani z poruszającą się jednostajnie szczeliną obserwacyjną, więc widzimy pozytron poruszający się w przód w czasie, a nie elektron poruszający się wstecz, ale obie interpretacje są jednakowo realne. John Wheeler poszedł o krok dalej, zwracając uwagę na możliwość, że wszystkie elektrony we wszechświecie są połączone oddziaływaniami i tworzą skomplikowany zygzak - w przód i w tył - poprzez czasoprzestrzeń. Częściowo pod wpływem tej inspiracji Feynman sformułował ostateczną wersję swej pracy - obraz „pojedynczego elektronu oscylującego w przód i w tył, w przód i w tył, w przód i w tył na wahadle czasu i tkającego bogatą tkaninę zawierającą być może wszystkie elektrony i pozytrony świata”⁸¹. W tym sformułowaniu każdy elektron w każdym zakątku wszechświata byłby po prostu jednym z odcinków jednej jedynej linii świata jedyne „prawdziwego” elektronu.

Pomysł ten nie zadziałał w naszym wszechświecie. Aby zadziałał, powinniśmy się spodziewać tyle samo odwróconych odcinków linii świata odpowiadających pozytronom, ile mamy odcinków skierowanych w przód - elektronów. Pomysł z unieruchomioną rzeczywistością, w której jedynie nasza percepcja świata się zmienia, także prawdopodobnie nie działa na tym uproszczonym poziomie - w jaki więc sposób można by ją pogodzić z zasadą nieoznaczoności?⁸² Jednak idee te stanowią znacznie lepsze wytłumaczenie natury czasu, niż niesie nam codzienne doświadczenie. Bieg czasu w naszym codziennym świecie jest efektem statystycznym, spowodowanym głównie przez rozszerzanie się wszechświata od stanu cieplejszego do zimniejszego.

Jednak nawet na tym poziomie równania teorii względności pozwalają na podróże w czasie; pojęcie to bardzo łatwo zrozumieć w kategoriach diagramów przestrzenno-czasowych⁸³.

Ruch w przestrzeni może się odbywać w dowolnym kierunku, także wstecz. Ruch w czasie na poziomie codziennego doświadczenia zmierza tylko w jednym kierunku, niezależnie od tego, co może się dziać na poziomie cząstek. Trudno zobrazować cztery wymiary czasoprzestrzeni, każdy pod kątem prostym do pozostałych, ale możemy odrzucić jeden wymiar i wyobrazić sobie, co oznaczałaby ta ścisła reguła, gdyby zastosować ją do jednego z trzech wymiarów, do których jesteśmy przyzwyczajeni. To byłoby tak, jakbyśmy mogli poruszać się w górę i w dół, w przód i w tył, ale ruch na boki byłby ograniczony tylko do poruszania się, powiedzmy, w lewo, a ruch w prawo byłby zabroniony. Gdybyśmy ustanowili to jako regułę w grze dla dzieci, a następnie kazali dzieciom osiągnąć cel, który znajduje się po ich prawej ręce („wstecz w czasie”), znalezienie wyjścia z pułapki nie zajęłoby im zbyt dużo czasu. Wystarczy odwrócić się do tyłu, zamieniając w ten sposób prawą stronę na lewą, a następnie dojść do celu, poruszając się w lewo. Można też położyć się na podłodze, w wyniku czego cel znajdzie się w kierunku „do góry” w stosunku do

⁸¹ Cytat oparty na relacji Wheelera, patrz B. Hoffmann, *The Strange Story of the Quantum*, s. 217.

⁸² Feynman w istocie posunął się znacznie dalej, niż wspominałem powyżej, i sformułował wersję linii świata uwzględniającą prawdopodobieństwa, stwarzając tym samym nową wersję mechaniki kwantowej, która jest (co wykazał Freeman Dyson) równoważna z oryginalną teorią w tym sensie, że daje takie same wyniki, ale okazuje się znacznie bardziej skuteczna jako narzędzie matematyczne. Więcej na ten temat później.

⁸³ Konsekwencje teorii względności dla naszego zrozumienia wszechświata, a także dla podróży w czasie, są szczegółowo omówione w mojej książce *Spacewarps* (wyd. Delacorte, New York; Pelican, London 1983).

naszej głowy, i poruszać się „do góry” ku niemu, następnie „w dół” do punktu wyjścia, i wreszcie wstać z powrotem na nogi, przywracając pierwotną orientację przestrzenną w stosunku do widzów⁸⁴. Technika podróży w czasie dozwolona przez teorię względności jest bardzo podobna. Sprowadza się ona do zakrzywienia struktury czasoprzestrzeni w taki sposób, że w lokalnym obszarze oś czasu jest skierowana w kierunku równoważnym do jednej z przestrzennych osi w niezakrzywionym obszarze. Jedna z pozostałych osi przestrzennych obejmuje rolę czasu i po zastąpieniu czasu przestrzenią urządzenie tego rodzaju pozwalałoby na prawdziwą podróż w czasie, w obu kierunkach.

Amerykański matematyk, Frank Tipler, wykonał obliczenia, które dowodzą, że taka sztuczka jest teoretycznie możliwa. Czasoprzestrzeń może zostać zakrzywiona przez silne pola grawitacyjne. Wyimaginowana maszyna czasu Tiplera jest bardzo ciężkim cylindrem, zawierającym taką ilość materii jak nasze Słońce, upakowaną w obszarze długim na 100 km i o średnicy 20 km, gęstym jak jądro atomowe, obracającym się dwukrotnie w ciągu milisekundy i pociągającym za sobą okoliczną strukturę czasoprzestrzeni. Powierzchnia cylindra musiałaby się poruszać z prędkością równą połowie prędkości światła. Nie jest to urządzenie, które mógłby wykonać w swoim garażu najbardziej szalony ze wszystkich szalonych wynalazców, ale nie zmienia to faktu, że żadne ze znanych nam praw fizyki nie stoi na przeszkodzie jego realizacji. Istnieje nawet obiekt we wszechświecie, który ma masę naszego Słońca, gęstość jądra atomowego i wiruje z prędkością jeden obrót na 1,5 milisekundy - tylko trzy razy wolniej niż maszyna czasu Tiplera. Jest to tak zwany pulsar milisekundowy, odkryty w 1982 roku. Jest bardzo mało prawdopodobne, aby miał on kształt cylindra - tak ekstremalnie szybka rotacja z całą pewnością spłaszczyłaby go do postaci naleśnika. Mimo to czasoprzestrzeń wokół niego niewątpliwie musi być mocno zakrzywiona. „Prawdziwa” podróż w czasie być może nie jest niemożliwa, ale na pewno niezwykle trudna do zrealizowania i bardzo, ale to bardzo mało prawdopodobna. Ten cienki koniec czegoś, co może się okazać bardzo dużym stożkiem, pozwala jednakże nieco łatwiej zaakceptować fakt, że na poziomie kwantowym podróż w czasie jest czymś zwyczajnym. Zarówno teoria kwantowa, jak i teoria względności dopuszczają podróże w czasie, w takiej czy innej formie. A wszystko, co jest dopuszczalne przez obie te teorie, jakkolwiek paradoksalne może się wydawać, musi być traktowane poważnie. Podróż w czasie jest rzeczywiście integralną częścią niektórych z najdziwniejszych właściwości świata cząstek, w którym można nawet dostać coś za nic, jeśli ma się dostatecznie szybki refleks.

Coś za nic

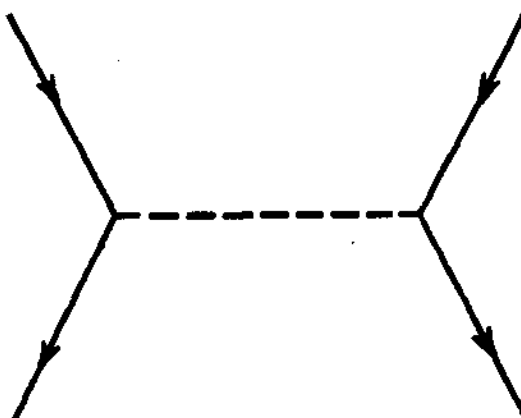
W 1935 roku Hideki Yukawa, dwudziestoosmioletni wykładowca fizyki na uniwersytecie w Osace, zaproponował wyjaśnienie, w jaki sposób neutrony i protony w jądrze mogłyby być utrzymane razem, pomimo dodatniego ładunku, który stara się rozbić jądro siłą elektryczną. Jest jasne, że musi istnieć inna, potężniejsza siła, która w odpowiednich warunkach przewycięża siłę

⁸⁴ Wypróbowałem tę grę na kilkorgu dzieci i osobno na dorosłych. Mniej więcej połowa dzieci zauważyła rozwiązanie. Bardzo niewielu dorosłych je odkryło, a ci, którzy go nie dostrzegli, oskarżali mnie o oszukiwanie. Faktem jest, że - zgodnie z równaniami Einsteina - sama natura nie stroni od tego rodzaju oszukiwania.

elektryczną. Oddziaływanie elektryczne jest przenoszone przez fotony, więc to silne oddziaływanie jądrowe musi także, rozumował Yukawa, być przenoszone przez jakąś cząstkę. Cząstka ta została nazwana mezonem (spodziewano się, że jest to cząstka pośrednia między elektronem a protonem, stąd nazwa). Mezony są bozonami, podobnie jak fotony, ale ze spinem równym jeden, a nie zero. W odróżnieniu od fotonów mają bardzo krótki czas życia, dlatego można je zobaczyć poza jądrem tylko w bardzo szczególnych warunkach. Ostatecznie odkryta została cała rodzina mezonów - niezupełnie tak, jak przewidywał Yukawa, ale w dostatecznej zgodności z jego teorią, aby wykazać, że idea wymiany mezonów pomiędzy cząstkami jądrowymi jako nośnika silnego oddziaływania jądrowego działa w sposób analogiczny do wymiany fotonów jako nośników siły elektrycznej. W 1949 roku Yukawa otrzymał zasłużoną Nagrodę Nobla.

To potwierdzenie, że siły jądrowe, podobnie jak siły elektryczne, można sobie wyobrażać w kategoriach oddziaływania między cząstkami, jest kamieniem węgielnym poglądu współczesnych fizyków na wszechświat. Wszystkie siły są obecnie uważane za oddziaływania.

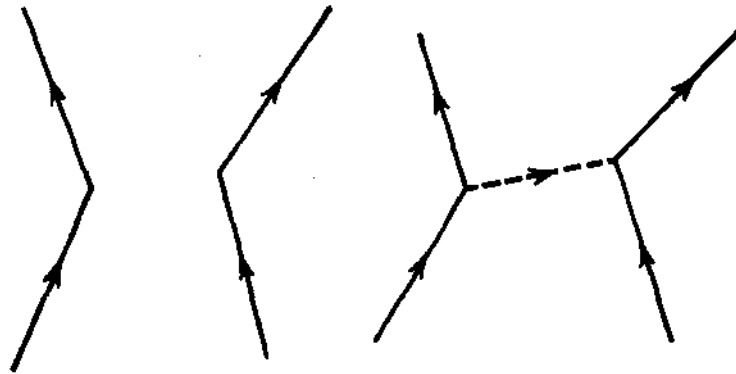
Skąd się jednak biorą cząstki, które przenoszą oddziaływania? Znikąd. Coś za nic, zgodnie z zasadą nieoznaczoności.



Ryc. 9.9. Diagram Feynmana, na którym dwie cząstki oddziałują poprzez wymianę trzeciej. Mogą to być dwa elektrony, które wymieniają foton i odpychają się nawzajem

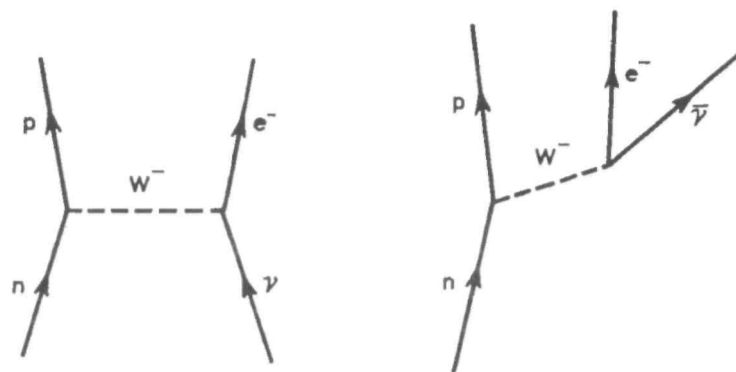
Zasada nieoznaczoności stosuje się do własności komplementarnych - czasu i energii, a także położenia i pędu. Im mniej jest niepewności związanej z energią jakiegoś zdarzenia na poziomie cząstek, tym bardziej niepewny jest moment czasu, w którym ono zaszło. I vice versa. Elektron nie istnieje w odosobnieniu, ponieważ może on pożyczyć energię od zasady nieoznaczoności na dostatecznie krótki czas, i zużyć ją do wytworzenia fotonu. Pułapka polega na tym, że niemal natychmiast po tym, jak foton zostanie stworzony, musi zostać z powrotem pochłonięty przez elektron, zanim reszta świata „zauważy”, że została naruszona zasada zachowania energii. Takie fotony istnieją przez niewielki ułamek sekundy, mniej niż 10^{-15} s, ale masowo rodzą się i giną wokół elektronów. To jest tak, jakby każdy elektron był otoczony przez chmurę wirtualnych fotonów, które potrzebują tylko lekkiego bodźca, nieco energii z zewnątrz, aby uniknąć swego losu i zaistnieć w rzeczywistości. Elektron w atomie przeskakujący ze wzbudzonego stanu energii na niższy poziom przekazuje nadwyżkę energii jednemu ze swoich wirtualnych fotonów i pozwala mu swobodnie

odlecieć; elektron pochłaniający energię łapie swobodny foton. Ten sam mechanizm - proces wymiany wirtualnych cząstek - wytwarza klej wiążący jądra.



Ryc. 9.10. Stara koncepcja „działania na odległość” (po lewej) jest zastąpiona przez wymianę cząstek jako nośników oddziaływania

Masa i energia są równoważne, więc, z grubsza rzecz biorąc „zasięg” siły jest odwrotnie proporcjonalny do masy cząstki, która stanowi klej, a jeżeli jest ich więcej, to do masy najbliższej z nich. Fotony nie mają masy, więc zasięg siły elektromagnetycznej jest teoretycznie nieskończony, aczkolwiek staje się ona nieskończenie mała w nieskończenie dużej odległości od ładunku elektrycznego, który jest jej źródłem. Hipotetyczne mezony Yukawy mają tak mały zasięg (co wynika wprost z zasięgu sił jądrowych), że muszą mieć masę około 200 do 300 razy większą od elektronu. Mezony odpowiedzialne za silne oddziaływania jądrowe zostały odkryte w promieniowaniu kosmicznym w 1946 roku i nazwane mezonami pi albo pionami. Neutralny (pozbawiony ładunku elektrycznego) pion ma masę 264 razy większą od masy elektronu, a oba pozostałe (ujemnie i dodatnio naładowany) mezony - 273 razy. Wazą zatem mniej więcej jedną siódmą tego co proton. Dwa protony są utrzymywane w jądrze przez nieustanną wymianę pionów ważących spory ułamek ich wagi, nie tracąc przy tym ani trochę własnej masy. Jest to możliwe tylko dlatego, że protony wykorzystują zasadę nieoznaczoności. Pion jest tworzony, przekazywany innemu protonowi i unicestwiany w mgnieniu niepewności, gdy wszechświat „nie patrzy”.

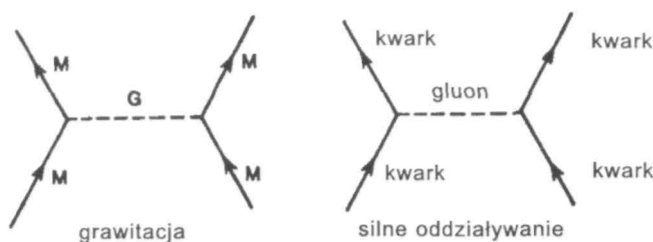


Ryc. 9.11. Dwa różne sposoby opisu tego samego zjawiska. Wchodzące do reakcji neutrino zostaje zastąpione przez wylatujące antyneutrino. Diagram opisuje rozpad beta, w którym neutron przekształca się w proton, elektron i antyneutrino

Protony i neutrony - nukleony - mogą wymieniać mezony tylko wtedy, gdy są bardzo blisko siebie, w zasadzie tylko wtedy, gdy się „dotykają” (jeżeli użylibyśmy określenia z codziennego świata), gdyż piony nie potrafiłyby pokonać większej odległości w ciągu czasu dozwolonego przez zasadę nieoznaczoności, jak widać, model ten bardzo dobrze wyjaśnia, dlaczego silne oddziaływanie nie wpływa na nukleony znajdujące się poza jądrem, a równocześnie wywiera potężny wpływ na nukleony wewnątrz jądra⁸⁵.

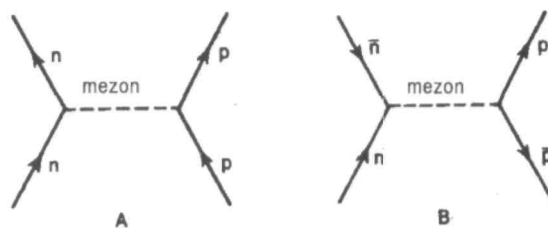
Tak więc proton jest ośrodkiem wirtualnej aktywności w jeszcze większym stopniu niż elektron. Swobodny proton przemieszczający się w przestrzeni (i w czasie) nieustannie emituje i reabsorbuje zarówno wirtualne fotony jak i wirtualne mezony. Co więcej, na zjawisko to można spojrzeć jeszcze inaczej. Wyobraźmy sobie jeden proton emitujący jeden pion, a następnie pochłaniający go z powrotem. Proste. Załóżmy teraz sytuację następującą. Najpierw mamy jeden proton, potem proton i pion, a na koniec znowu jeden proton. Protony są nierozróżnialne, więc możemy powiedzieć, że pierwszy proton znika i przeznacza swoją masę oraz pewną nadwyżkę pożyczoną od zasady nieoznaczoności na wytworzenie pionu i nowego protonu. Wkrótce potem dwie cząstki zderzają się i znikają, tworząc trzeci proton i przywracając bilans energii we wszechświecie. Na tym jednak nie koniec. Nasz początkowy proton mógłby przecież przeznaczyć swoją energię, razem z niewielką nadwyżką, na wytworzenie neutronu i dodatnio naładowanego pionu. Proton może wymienić dodatnio naładowany pion z neutronem, w wyniku czego „staje się” neutronem, a neutron „staje się” protonem. Taki proces jest również możliwy, podobnie jak proces przeciwny, gdzie neutron „staje się” protonem, wymieniając ujemnie naładowany pion.

Można to do woli skomplikować, gdyż nie ma powodu, abyśmy mieli w tym miejscu powściągnąć wodze wyobraźni. W podobny sposób pion może stać się na krótką chwilę neutronem i antyprotonem; może się to także przydarzyć wirtualnemu pionowi, który sam jest elementem diagramu Feynmana dla protonu lub neutronu. Podróżujący spokojnie proton może eksplodować, tworząc ruchliwą sieć wirtualnych cząstek, które oddziałują ze sobą nawzajem, a następnie powrócić do normalnej postaci.

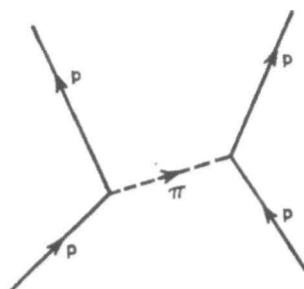


Ryc. 9.12. Wszystkie fundamentalne oddziaływania można przedstawić jako wymianę cząstek pośredniczących. Dwie obdarzone masą cząstki (A) oddziałują przez wymianę grawitonu (G), a dwa kwarki przez wymianę gluonu

⁸⁵ W rzeczywistości Yukawa przeprowadził swoje obliczenia w odwrotnym kierunku. Znał zasięg silnego oddziaływania jądrowego, co pozwoliło mu ustalić granice nieoznaczoności czasu w oddziaływaniach jądrowych, a to z kolei umożliwiło określenie, jakiego rzędu energii, a więc i masy, należy się spodziewać po cząstkach przenoszących (pośredniczących) oddziaływanie.



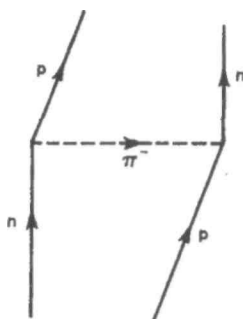
Ryc. 9.13. Kierunek upływu czasu na diagramach Feynmana jest, jak zawsze, kwestią wyboru. W przypadku A neutron i proton, poruszając się w górę rysunku, oddziałują przez wymianę mezonu. W przypadku B neutron i antyneutron, poruszając się od lewej do prawej, zderzają się, ulegają anihilacji, dając mezon, który z kolei rozpada się na parę proton-antyproton. Takie „skrzyżowane” reakcje pokazują, dlaczego pojęcia cząstki i siły stają się nieodróżnialne



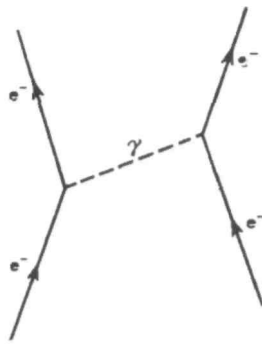
Ryc. 9.14. Dwa protony odpychają się, wymieniając pion

Wszystkie cząstki można w tym sensie uważać za recombacje innych cząstek powiązanych w „kosmicznym tańcu”, żeby użyć określenia Fritjofa Capry. Na tym jednak wciąż jeszcze nie koniec. Jak dotąd nie dostaliśmy czegoś za nic, chociaż dostaliśmy bardzo dużo za bardzo mało. A więc idźmy dalej.

Jeżeli dostępna cząstce energia jest w pewien sposób nieokreślona przez dostatecznie krótki czas, możemy także powiedzieć, że zasada nieoznaczoności pozwala cząstce zaistnieć przez dostatecznie krótki czas. Jeżeli tylko spełnione są pewne ograniczenia, takie jak zachowanie ładunku elektrycznego i równowaga między cząstkami i antycząstkami, nic nie stoi na przeszkodzie, aby cząstki pojawiały się całymi grupami z niczego, a następnie łączyły ze sobą i zniknęły, zanim wszechświat dookoła zauważy niezgodność.

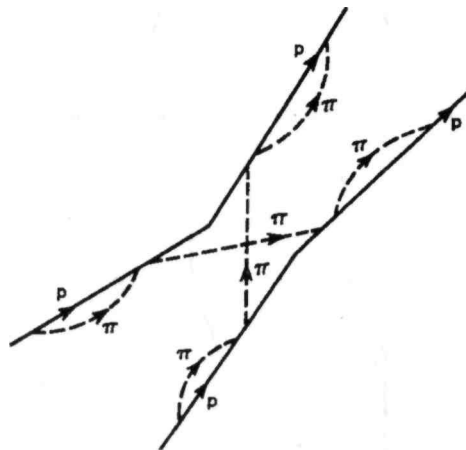


Ryc. 9.15. Dwa elektrony oddziałują przez wymianę fotonu

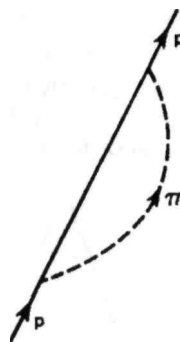


Ryc. 9.16. Przez wymianę obdarzonego ładunkiem pionu neutron przekształca się w proton, a proton w neutron

Elektron i pozyton mogą powstać z niczego, pod warunkiem że znikną dostatecznie szybko; to samo mogą zrobić proton i antyproton. Ściśle rzecz biorąc, elektrony mogą dokonać tej sztuczki z pomocą fotonu, a protony z pomocą mezonu, ze względu na fakt, że konieczny jest efekt „rozproszenia”. Nie istniejący foton kreuje parę elektron-pozyton, którą następnie anihiluje, dając z powrotem foton, z którego powstała. Pamiętajmy, że foton nie dostrzega różnicy między przyszłością a przeszłością.



Ryc. 9.17. Proton może także wytworzyć „wirtualny” pion, pod warunkiem że dostatecznie szybko go z powrotem pochłonie



Ryc. 9.18. Odpychanie się dwóch protonów przez wymianę pionów jest nieco bardziej skomplikowane, niż mogło nam się wydawać na podstawie ryc. 9.14

Można spojrzeć na to samo zjawisko inaczej i uznać, że elektron biegnie za swym własnym ogonem w pętli czasu. Najpierw pojawia się, wyskakując z nicości jak królik z kapelusza, potem

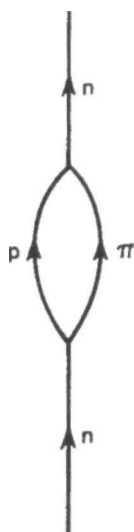
przez chwilę porusza się w przód w czasie, zanim zorientuje się w pomyłce, uzna swą nierzeczywistość, zawróci i podąży z powrotem tam, skąd przyszedł, wstecz w czasie do punktu wyjścia. Tam ponownie zmienia kierunek i w ten sposób pętla się zamyka - na skutek zderzeń z wysokoenergetycznym fotonem na każdym „końcu”.

Zgodnie z najlepszymi teoriami nawet w nieobecności „prawdziwych” cząstek próżnia jest w swej istocie kipiącą masą wirtualnych cząstek. I nie jest to jedynie jałowe manipulowanie równaniami, gdyż bez uwzględnienia wpływu tych fluktuacji próżni po prostu nie otrzymamy właściwych rozwiązań problemów związanych z wzajemnym rozpraszaniem cząstek. Jest to mocny argument za tym, że teoria - jak pamiętamy, oparta bezpośrednio na relacjach nieoznaczoności - jest poprawna. Wirtualne cząstki i fluktuacje próżni są równie rzeczywiste jak reszta teorii kwantowej - równie rzeczywiste, jak dualizm falowo-korpuskularny, zasada nieoznaczoności i działanie na odległość. W takim świecie nazywanie zagadki kota Schrödingera paradoksem wydaje się przesadą.

Kot Schrödingera

Ten sławny paradoks został po raz pierwszy opublikowany („Naturwissenschaften”, t. 23, s. 812) w 1935 roku - w tym samym czasie co praca EPR. Einstein uznał propozycję Schrödingera za „najładniejszy sposób” wykazania, że teoria falowa materii jest niekompletnym opisem rzeczywistości⁸⁶. Wspólnie z argumentem EPR paradoks kota jest do dzisiaj tematem dyskusji w teorii kwantowej. W odróżnieniu od EPR nie został jednak powszechnie uznany za rozstrzygnięty⁸⁷.

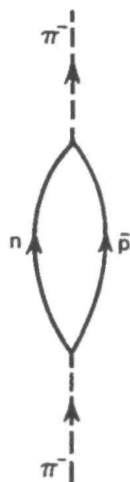
Sam pomysł tego eksperymentu myślowego jest bardzo prosty. Schrödinger proponuje, abyśmy wyobrazili sobie pudło zawierające radioaktywną próbkę, detektor wykrywający obecność radioaktywnych cząstek (na przykład licznik Geigera), szklaną fiolkę z trucizną (cyjankiem) oraz żywego kota.



⁸⁶ Por. na przykład listy 16-18 w: E. Schrödinger, *Letters on Wave Mechanics*.

⁸⁷ W 1997 roku zespół Serge'a Haroche'a z Ecole Normale Supérieure w Paryżu uczynił pierwszy krok na drodze do eksperymentalnej realizacji kota Schrödingera. W roli kota wystąpiła nadprzewodząca wnęka mikrofalowa (o makroskopowych rozmiarach), której kwantowe stany były sprzężone ze stanem przelatującego przez wnękę atomu rubidu (przyp. tłum.).

Ryc. 9.19. Neutron może na krótką chwilę zamienić się w proton i (elektrycznie naładowany) pion, pod warunkiem że dostatecznie szybko powróci do pierwotnej postaci



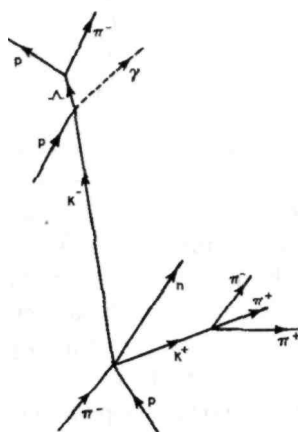
Ryc. 9.20. Z kolei pion może na równie krótki czas zamienić się w wirtualną parę neutron-antyneutron

Całość jest tak skonstruowana, że licznik może być włączony na czas potrzebny do tego, aby z prawdopodobieństwem równym 1/2 któryś z atomów w próbce rozpadł się i licznik wykrył cząstkę będącą produktem rozpadu. Jeżeli detektor wykryje rozpad, to szklana fiolka zostanie stłuczona i kot zginie; w przeciwnym razie kot przeżyje. Nie mamy żadnego sposobu, aby poznać wynik tego eksperymentu, dopóki nie otworzymy pudła i nie zajrzemy do środka, gdyż rozpad radioaktywny zachodzi całkowicie losowo i jest przewidywalny jedynie w sensie statystycznym. Zgodnie ze ścisłą wykładnią interpretacji kopenhaskiej, podobnie jak w doświadczeniu z dwiema szczelinami jest jednakowo prawdopodobne, że elektron przejdzie przez którąś szczelinę i dwie nakładające się możliwości dadzą superpozycję, czyli nałożenie dwóch stanów, także i w tym wypadku równe prawdopodobieństwa zajścia i niezajścia rozpadu radioaktywnego powinny dać superpozycję stanów. Cały eksperyment, łącznie z kotem, działa zgodnie z zasadą, że superpozycja jest „rzeczywista”, dopóki nie popatrzymy na wynik eksperymentu, i dopiero w momencie obserwacji funkcja falowa zapada się do jednego z dwóch stanów. Dopóki nie zajrzemy do środka, znajduje się tam radioaktywna próbka, która zarówno się rozpadła, jak i nie rozpadła, szklana fiolka, która jest równocześnie rozbita i cała, oraz kot, który jest równocześnie martwy i żywy, ani żywy, ani martwy.

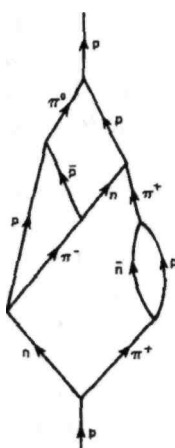
Dostatecznie trudno wyobrazić sobie cząstkę elementarną w rodzaju elektronu będącą ani tu, ani tam, lecz w jakiejś superpozycji stanów, ale wyobrazić sobie w tym stanie zawieszenia coś tak zwykłego jak kot jest jeszcze trudniej. Schrödinger wymyślił ten przykład, aby wskazać słaby punkt ściśle pojmowanej interpretacji kopenhaskiej, gdyż w oczywisty sposób kot nie może być równocześnie żywy i martwy. Czy to jednak jest dużo bardziej „oczywiste” niż „fakt”, że elektron nie może równocześnie być falą i cząstką? Zdrowy rozsądek został już poddany próbie jako przewodnik po kwantowej rzeczywistości i nie wypadł najlepiej. Jedną rzeczą, którą wiemy na pewno o świecie kwantów, to to, że nie należy ufać zdrowemu rozsądkowi i wierzyć jedynie w to,

co bezpośrednio widzimy lub wykrywamy przy użyciu instrumentów. Nie wiemy, co się dzieje wewnątrz pudła, jeżeli nie zajrzemy do środka.

Dyskusja wokół kota w pudle trwa już ponad pięćdziesiąt lat. Jedna ze szkół twierdzi, że nie ma problemu, gdyż sam kot jest całkowicie zdolny do oceny, czy jest żywy czy martwy; świadomość kota wystarcza, aby wywołać kolaps funkcji falowej.



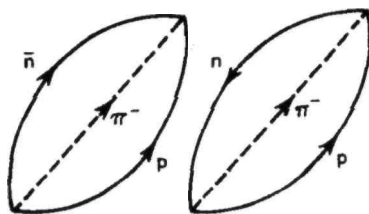
Ryc. 9.21. Diagram Feynmana, na którym przedstawione jest oryginalne oddziaływanie kilku cząstek zarejestrowane przez komorę pęcherzykową. Zjawisko opisane przez Fritjofa Caprę w *Tao fizyki*



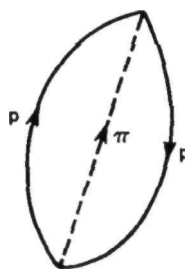
Ryc. 9.22. Pojedynczy proton uwikłany w sieć wirtualnych oddziaływań (K. Ford, *The World of Elementary Particles* [Świat cząstek elementarnych], Blaisdell, New York 1963). Żadna cząstka we wszechświecie nie jest samotna - przez cały czas ma wirtualne towarzystwo

Gdzie w takim razie przebiega granica? Czy mrówka byłaby świadoma, co się dzieje, albo bakteria? Rozumując w przeciwnym kierunku, możemy wyobrazić sobie człowieka ochotnika (to tylko eksperyment myślowy), który zajmie miejsce kota w pudle. Ochotnik ten jest czasem określany mianem przyjaciela Wignera, od Eugene'a Wignera, fizyka, który poświęcił wiele pracy nad wariantami eksperymentu z kotem w pudle, i który, nawiasem mówiąc, był szwagrem Diraca. Ochotnik jest oczywiście kompetentnym obserwatorem mającym kwantowo-mechaniczną zdolność zapadania funkcji falowych. Gdy otworzymy pudło i okaże się, że szczęśliwie znaleźliśmy go przy życiu, możemy być pewni, że nie opowie nam o żadnych mistycznych doznaniach, ale po prostu stwierdzi, że radio aktywna próbka nie wyprodukowała żadnych cząstek w wyznaczonym czasie.

Mimo to dla obserwatora z zewnątrz - dopóki nie zagłębnie do środka - jedynym poprawnym sposobem opisu sytuacji wewnątrz pudła jest superpozycja stanów.



Ryc. 9.23. Proton, antyneutron i pion wyłaniają się z nicności jako fluktuacja próżni i po krótkiej chwili ulegają anihilacji (A). To samo oddziaływanie można przedstawić jako pętlę w czasie, wokół której ścigają się proton i neutron, a pion łączy jej dwa końce (B). Oba diagramy są równoważne



Ryc. 9.24. Na podobnej zasadzie jeden proton może gonić własny ogon

Przykład ten można ciągnąć bez końca. Wyobraźmy sobie, że ogłosiliśmy zaintrygowanemu światu zamiar przeprowadzenia tego eksperymentu, lecz aby uniknąć kłopotów z prasą, wykonaliśmy go za zamkniętymi drzwiami. Nawet gdy już otworzymy pudło i albo przywitamy naszego przyjaciela, albo wyciągniemy jego zwłoki, dziennikarze na zewnątrz wciąż nie będą wiedzieć, jaki jest wynik. Z ich punktu widzenia cały budynek laboratorium jest superpozycją stanów. I tak dalej, w nieskończoność.

Przypuśćmy jednak, że zastąpimy przyjaciela Wignera komputerem, który może równie dobrze zarejestrować informację o rozpadzie radioaktywnym lub jego braku. Czy komputer może spowodować kolaps funkcji falowej (przynajmniej wewnątrz pudła)? Dlaczego nie? Zgodnie z jeszcze innym punktem widzenia nie jest istotne, czy rezultat eksperymentu pozna człowiek bądź w ogóle jakakolwiek żywa istota, ale to, czy wynik na poziomie kwantowym został zarejestrowany lub w inny sposób wywarł wpływ na makroświat. Radioaktywny atom może znajdować się w superpozycji stanów, ale gdy tylko licznik Geigera zacznie „szukać” produktów rozpadu, atom jest zmuszony do przejścia w jeden ze stanów i podjąć decyzję, czy się rozpadł czy nie.

Tak więc, w odróżnieniu od myślowego doświadczenia EPR, eksperyment z kotem w pudle rzeczywiście zawiera aspekty paradoksalne. Nie da się go pogodzić z ortodoksyjną interpretacją kopenhaską, jeśli nie uzna się „realności” martwo-żywego kota. Ta konkluzja skłoniła Wignera i Johna Wheelera do rozważenia możliwości, że ze względu na nieskończony łańcuch przyczynowo-skutkowy cały wszechświat może „realnie” istnieć dlatego, że jest obserwowany przez inteligentne istoty. Najbardziej paradoksalna ze wszystkich konsekwencji teorii kwantowej -

koncepcja oparta na doświadczeniu nazwanym przez Wheelera eksperymentem z opóźnionym wyborem - jest bezpośrednim sukcesorem kota Schrödingera.

Wszechświat współuczestniczący

Wheeler napisał wiele tysięcy słów na temat interpretacji teorii kwantowej, w wielu różnych publikacjach w okresie czterdziestu lat pracy⁸⁸. Zapewne najlepszym przedstawieniem koncepcji „współuczestniczącego wszechświata” jest jego artykuł, który ukazał się w *Some Strangeness in the Proportion*, sprawozdaniu (pod red. Harry'ego Woolfa) z sympozjum z okazji setnej rocznicy urodzin Einsteina. W pracy tej (rozdział 22 sprawozdania) Wheeler wspomina anegdotę z przeszłości, gdy na przyjęciu grał w dwadzieścia pytań. Gdy nadeszła jego kolej, aby wyjść za drzwi, podczas gdy reszta gości uzgadniała, czym ma być „to”, Wheeler musiał „niewiarygodnie długo” czekać, co było oczywistym znakiem, że współuczestnicy zabawy wybierali wyjątkowo trudne słowo albo planowali jakiś podstęp. Po powrocie do pokoju zaczęła się gra i z początku odpowiedzi kolejnych uczestników na pytania w rodzaju „Czy to zwierzę?” padały bardzo szybko, ale w miarę upływu czasu na odpowiedzi trzeba było czekać coraz dłużej - dziwna rzecz, zważywszy, że uczestnicy mieli uzgodniony wcześniej obiekt gry, a jedyną wymaganą odpowiedzią było „Tak” lub „Nie”. Dlaczego ktoś miałby tak głęboko się zastanawiać nad udzieleniem prostej odpowiedzi? W końcu, mając już tylko ostatnie pytanie w zapasie, Wheeler musiał strzelać: „Czy to jest chmura?” Odpowiedzi „Tak” towarzyszył wybuch śmiechu wszystkich uczestników. Wówczas Wheeler poznał ich sekret.

Spisek polegał na tym, że gracze zdecydowali się nie uzgadniać obiektu gry, lecz każdy po kolei miał za zadanie udzielić prawidłowej odpowiedzi dotyczącej jakiegoś pomyślanego przez siebie, ale realnego obiektu; odpowiedź musiała być zgodna ze wszystkimi dotychczas udzielonymi odpowiedziami. W miarę postępu gry stawała się ona równie trudna dla pytanych jak dla pytającego.

Co to ma wspólnego z teorią kwantową? Podobnie jak nasza idea realnego świata istniejącego niezależnie od tego, czy na niego patrzymy czy nie, Wheeler sądził, że istnieje obiekt, którego tożsamość próbuje odkryć. Tak wszakże nie było. Jediną realną rzeczą były odpowiedzi na jego pytania, dokładnie tak jak jedyną realną rzeczą, jaką wiemy o świecie kwantów, są wyniki eksperymentów. Chmura została w pewnym sensie stworzona w trakcie zadawania pytań i w tym samym sensie elektron jest stworzony w trakcie eksperymentalnego badania. Ta historia odzwierciedla fundamentalny aksjomat teorii kwantowej, zgodnie z którym żadne fundamentalne zjawisko nie jest zjawiskiem, dopóki nie zostanie zarejestrowane. A proces rejestracji może sprawić, że z naszym pojęciem rzeczywistości zaczną się dziać dziwne rzeczy.

Dla zobrazowania swej koncepcji Wheeler wykonał jeszcze jedno doświadczenie myślowe będące wariantem eksperymentu z dwiema szczelinami. W tej wersji gry za szczelinami

⁸⁸ John Wheeler urodził się w 1911 roku, więc należał do pokolenia, na które odkrycia lat dwudziestych wywarły największy wpływ. Późniejsze pokolenia były bardziej skłonne do przyjęcia teorii kwantowej jako nauki objawionej i potraktowania kwantowej kuchni jako uznanych reguł gry; pionierski zapał starszego pokolenia przygasł na skutek poczucia ulgi po odkryciu spójnej teorii i naturalnych efektów związanych z wiekiem. Generacja Feynmana i Wheelera najsilniej zaangażowała się w poszukiwanie w tym wszystkim sensu, wraz z Einsteinem, który jak zwykle był wyjątkiem.

ustawiona jest soczewka skupiająca światło przechodzące przez układ, a ekran zastępuje inna soczewka, która powoduje, że fotony nadchodzące z obu szczelin rozbiegają się. Foton, który przechodzi przez lewą szczelinę, pada na drugi ekran i jest odchylany przez drugą soczewkę w stronę detektora po prawej stronie, foton przechodzący przez prawą szczelinę pada na detektor po lewej stronie. W tym układzie wiemy, przez który otwór przeszedł foton, z taką samą pewnością jak w wersji, w której obserwowaliśmy bezpośrednio obie szczeliny. Podobnie jak wtedy, jeżeli pozwolimy tylko jednemu fotonowi przejść przez aparaturę, jednoznacznie identyfikujemy jego drogę; interferencja nie powstaje, ponieważ nie ma superpozycji stanów.

Zmodyfikujmy aparaturę ponownie. Zakryjmy drugą soczewkę błoną fotograficzną ułożoną tak, by tworzyła wzór podobny do żaluzji⁸⁹. Paski żaluzji można ustawić tak, aby utworzyły zwykły ekran i przeszkodziły fotonom w dotarciu do drugiej soczewki, albo tak, aby fotony zostały przepuszczone i odchylone w stronę odpowiedniego detektora. Tak więc, gdy żaluzja jest zamknięta, fotony padają na ekran tak jak w klasycznym eksperymencie z dwiema szczelinami. Nie mamy sposobu na ustalenie, przez który otwór fotony przechodzą i otrzymujemy obraz interferencyjny, jakby każdy foton przeszedł przez obie szczeliny równocześnie. A teraz wykonajmy pewną sztuczkę. W tym układzie nie musimy decydować się na otwarcie lub zamknięcie żaluzji, zanim foton minie ścianę ze szczelinami. Możemy zaczekać, aż minie je obie i wtedy postanowić, czy stworzyć eksperyment bez czy z układem wykrywającym, przez którą szczelinę przechodzi foton, czyli czy przechodzi przez jedną czy przez „obie naraz”. W doświadczeniu z opóźnionym wyborem coś, co robimy teraz, ma nieusuwalny wpływ na to, co możemy powiedzieć o przeszłości. Historia, przynajmniej dla jednego fotonu, zależy od tego, w jaki sposób zdecydujemy się wykonać pomiar.

Filozofowie od dawna zastanawiali się nad faktem, że historia nie ma znaczenia - przeszłość nie istnieje - z wyjątkiem tego, jak jest zapisana w teraźniejszości. Eksperyment Wheelera realizuje tę abstrakcyjną koncepcję w praktyczny i namacalny sposób. „Mamy nie większe prawo powiedzieć »co foton robi«, dopóki nie zostanie zarejestrowany, niż »jakie słowo jest zgadywane«, dopóki gra w dwadzieścia pytań się nie skończy”.

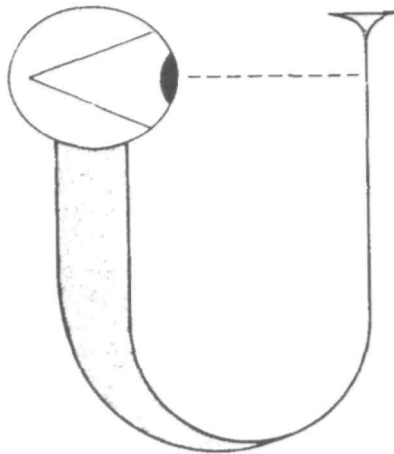
⁸⁹ Zastona złożona z wąskich pasków, które można przekręcać wokół osi tak, że ustawiają się podłużnie lub poprzecznie do płaszczyzny okna, zasłaniając lub odsłaniając światło padające z zewnątrz (przyp. tłum.).



Ryc. 9.25. Eksperyment Wheelera z dwiema szczelinami z opóźnionym wyborem (por. tekst)

Jak daleko ta idea może nas doprowadzić? Radośni kucharze kwantowi, konstruujący swoje komputery i manipulujący genami, powiedzą zapewne, że są to wszystko filozoficzne spekulacje, które nic nie znaczą w codziennym, makroskopowym świecie. Wszakże w świecie makroskopowym wszystko składa się z cząstek, które przestrzegają reguł kwantowych. Wszystko, co uważamy za realne, składa się z rzeczy, których nie można uznać za realne; „czy mamy inny wybór, jak tylko stwierdzić, że w jakiś sposób, dotąd nie odkryty, wszystko musi być zbudowane z miliardów miliardów takich zdarzeń opartych na zjawisku współdziałania obserwatora?”

Wheeler nigdy nie bał się stawiać śmiałych hipotez opartych na intuicji (pamiętamy jego pomysł z pojedynczym elektronem tkającym swoją ścieżkę przez przestrzeń i czas). Także i tym razem uczynił wielki krok w nieznaną i zaproponował koncepcję całego wszechświata jako współuczestniczącego, samowzbudzonego układu. Poczynając od wielkiego wybuchu wszechświat rozszerza się i ochładza; po tysiącach milionów lat stwarza istoty zdolne do obserwowania wszechświata, a „akt współuczestniczenia obserwatora - poprzez mechanizm opóźnionego wyboru - nadaje światu namacalną »realność« nie tylko w chwili obecnej, ale także wstecz, aż do początku”. Poprzez obserwację fotonów kosmicznego promieniowania tła tego echa wielkiego wybuchu, być może stwarzamy i wielki wybuch, i sam wszechświat. Jeżeli Wheeler ma rację, to Feynman był jeszcze bliżej prawdy, niż to sobie uświadamiał, gdy powiedział, że eksperyment z dwiema szczelinami „zawiera jedyną tajemnicę”.



Ryc. 9.26. Wszechświat jako całość można uważać za eksperyment z opóźnionym wyborem. Istnienie świadomych obserwatorów nadaje wszechświatowi realność

Śledząc koncepcje Wheelera, zabłądziłszy w sferę metafizyki i wyobrażam sobie, że wielu czytelników dochodzi do wniosku, że skoro wszystko opiera się na hipotetycznych doświadczeniach myślowych, to możemy wybrać sobie taką grę, jaka nam się podoba i nie ma istotnego znaczenia, którą interpretację rzeczywistości uznajemy. Potrzeba nam solidnych dowodów z prawdziwych eksperymentów, na których będziemy mogli się oprzeć, oceniając i wybierając najlepszą spośród metafizycznych opcji, które są nam dane. Tych solidnych dowodów dostarczyły nam eksperymenty Aspecta na początku lat osiemdziesiątych - wykazały one, że kwantowe osobliwości są nie tylko realne, ale także obserwowalne i mierzalne.

Rozdział dziesiąty

Koronny dowód

Bezpośredni eksperymentalny dowód na paradoksalną rzeczywistość kwantowego świata wywodzi się ze współczesnej wersji myślowego eksperymentu EPR, która opiera się na pomiarach nie położenia i pędu cząstek, ale spinu i polaryzacji - własności światła, która pod pewnymi względami jest odpowiednikiem spinu cząstki materialnej. David Bohm z Birkbeck College w Londynie opublikował pomysł pomiaru spinu w nowej wersji eksperymentu EPR w 1952 roku, ale dopiero w latach sześćdziesiątych potraktowano poważnie możliwość wykonania tego rodzaju doświadczenia w celu sprawdzenia przewidywań teorii kwantowej. Konceptyjny przełom nastąpił w 1964 roku, dzięki pracy Johna Bella, fizyka pracującego w CERN-ie, Europejskim Centrum Badań Jądrowych koło Genewy⁹⁰. Jednak dla zrozumienia tych eksperymentów konieczna jest mała dygresja, która pozwoli nam ustalić, co oznaczają słowa „spin” i „polaryzacja”.

Paradoks spinu

Tak się szczęśliwie składa, że w analizie tych eksperymentów niektóre spośród osobliwych właściwości spinu cząstki takiej jak elektron mogą zostać pominięte. Nie ma znaczenia, że cząstka musi „obrócić się” dwa razy, zanim ponownie pokaże to samo oblicze. Istotny jest fakt, że spin cząstki wyznacza kierunek w przestrzeni, w górę i w dół, analogicznie do kierunku północ-południe wyznaczonego przez oś wirowania Ziemi. Umieszczony w polu magnetycznym elektron może ustawić swój spin tylko w dwóch możliwych stanach, równoległe lub antyrównoległe do kierunku pola, „w górę” lub „w dół” - jak to arbitralnie nazywamy. Wersja Bohma eksperymentu EPR bierze za punkt wyjścia parę protonów złączonych w układzie zwanym stanem singletowym. Całkowity moment pędu takiej pary protonów jest zawsze równy zero. Możemy sobie wyobrazić rozpad pary na dwie części, które rozbiegają się w przeciwnych kierunkach. Każdy z dwóch protonów może mieć niezerowy moment pędu oraz spin, ale muszą one mieć spiny o tej samej wielkości i przeciwnym znaku, aby ich łączny spin zawsze wynosił zero, tak jak na początku, gdy były złączone⁹¹.

W tym punkcie teoria kwantowa zgadza się z mechaniką klasyczną. Jeżeli znamy kręt jednej cząstki, to znamy także kręt drugiej, gdyż suma jest równa zero. W jaki sposób mierzymy kręt cząstki? W wersji klasycznej pomiar jest prosty. Ponieważ mamy do czynienia z cząstkami w trójwymiarowym świecie, musimy zmierzyć trzy kierunki krętu. Te trzy składniki dodane do siebie (za pomocą algebry wektorów, której nie będziemy tutaj wprowadzać) dają całkowity kręt cząstki. Jednak w świecie kwantowym sytuacja jest inna. Po pierwsze, mierząc jedną składową spinu,

⁹⁰ J.S. Bell, „Physics”, 1964, t. 1, s. 195.

⁹¹ W tym przykładzie opieram się na bardzo jasnym i szczegółowym opisie eksperymentu Bella przedstawionym przez Bernarda d'Espagnata w *The Quantum Theory and Reality* [Teoria kwantowa a rzeczywistość], „Scientific American Offprint”, nr 3066. Moja wersja jest jednakże bardzo uproszczona - artykuł d'Espagnata zawiera znacznie więcej szczegółów.

zmieniamy pozostałe składowe; wektory spinu są własnościami komplementarnymi i nie da się ich mierzyć równocześnie, podobnie jak nie da się równocześnie mierzyć położenia i pędu. Po drugie, spin cząstek takich jak elektron i proton jest sam w sobie skwantowany. Jeśli zmierzmy spin w jakimkolwiek kierunku, otrzymamy tylko odpowiedź „w górę” lub „w dół”, czasami zapisywaną jako +1 lub -1. Jeśli zmierzmy spin w pewnym kierunku, który nazwiemy umownie osią z, to możemy uzyskać odpowiedź +1 (szansa na ten wynik wynosi dokładnie 1/2). Jeśli teraz zmierzmy spin w innym kierunku, na przykład wzdłuż osi y, a następnie ponownie dokonamy pomiaru wzdłuż osi z, którego wynik już „znamy”, to okaże się, że równie dobrze możemy otrzymać +1, jak i -1. Powtórzmy pomiar wielokrotnie i zobaczymy, jakie wyniki otrzymamy. Mimo że przed pomiarem spinu w kierunku y wykonaliśmy pomiar w kierunku z i dowiedzieliśmy się, że był on „w górę”, powtórny pomiar w kierunku z (wykonany po pomiarze w kierunku y) daje wynik „w górę” tylko w połowie wypadków. Pomiar komplementarnego wektora spinu przywrócił nieokreśloność poprzednio zmierzonego stanu⁹².

*

**

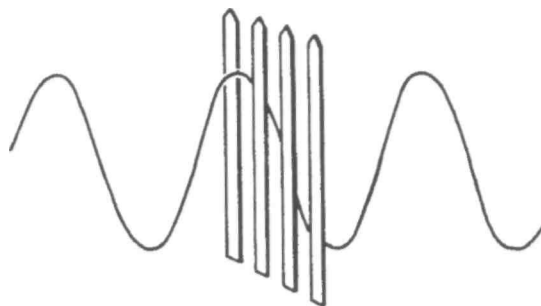
Co się zatem dzieje, gdy próbujemy mierzyć spin jednej z naszych dwóch rozbiegających się cząstek? Możemy uznać, że stan składowych spinu każdej cząstki traktowanej osobno podlega przypadkowym fluktuacjom, które uniemożliwiają jakąkolwiek próbę pomiaru całkowitego spinu jednej z cząstek. Jednak traktowane jako całość obie cząstki muszą mieć spiny dokładnie równe i o przeciwnych znakach. Tak więc przypadkowe fluktuacje spinu jednej cząstki muszą być połączone z równoważnymi - równymi i o przeciwnym znaku - „przypadkowymi” fluktuacjami składowych spinu drugiej cząstki, która może znajdować się w dużej odległości od pierwszej. Podobnie jak w pierwotnym eksperymencie EPR cząstki są połączone przez działanie na odległość. Einstein uważał tę „widmową” nielokalność za absurd będący słabym punktem teorii kwantowej. John Bell pokazał, w jaki sposób można skonstruować eksperymenty mierzące tę widmową nielokalność i dowodzące poprawności teorii kwantowej.

Zagadka polaryzacji

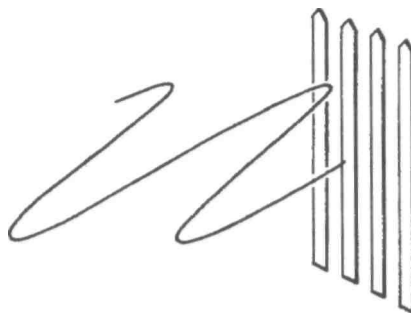
Większość dotychczas wykonywanych doświadczalnych testów EPR polegała na pomiarach polaryzacji fotonów, a nie spinu cząstek materii, lecz zasada pozostaje ta sama. Polaryzacja jest własnością określającą kierunek w przestrzeni związany z fotonem lub wiązką fotonów, podobnie jak spin określa kierunek w przestrzeni związany z materialną cząstką. Okulary słoneczne Polaroida działają na tej zasadzie, że blokują wszystkie fotony nie mające określonej polaryzacji, zaciemniając tym samym oglądany przez nas obraz. Wyobraźmy sobie okulary wykonane z wielu listewek jak żaluzja oraz fotony niosące długie włócznie. Wszystkie fotony trzymające swoje włócznie równoległe do listewek żaluzji mogą się przez nią prześlizgnąć i dotrzeć do oczu właściciela okularów; fotony, które trzymają włócznie pionowo, nie mogą przedostać się przez wąskie

⁹² Może nam się wydawać, że niepewność powinna wynosić \hbar . Podstawową jednostką spinu jest $1/2 \hbar$, jak ustalił Dirac, i tę właśnie wielkość mamy na myśli, używając skróconego zapisu „+1 jednostka spinu”. Różnica pomiędzy +1 a -1 tej jednostki jest równa różnicy między plus a minus $1/2 \hbar$, co oczywiście wynosi właśnie \hbar . W rozważanych powyżej doświadczeniach istotny jest tylko kierunek spinu.

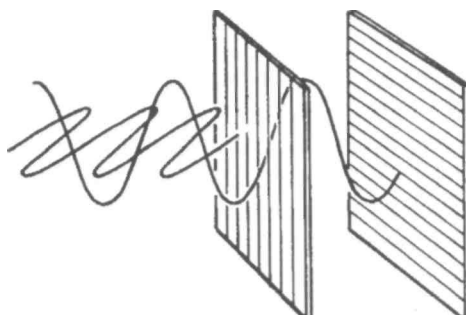
szczeliny w żaluzji i zostają zatrzymane. Zwykłe światło zawiera wszystkie kierunki polaryzacji - fotony trzymające na piersi swe włócznie pod różnymi kątami. Istnieje także polaryzacja zwana kołową, kiedy kierunek polaryzacji zmienia się wraz z ruchem postępowym fotonu. Gdyby posłużyć się powyższą analogią, polaryzacja kołowa byłaby reprezentowana przez kierunek pałeczki, którą kręci młynka dobosz maszerujący na czele parady.



Ryc. 10.1. Pionowo spolaryzowane fale prześlizgują się przez „sztachety”



Ryc. 10.2. Poziomo spolaryzowane fale nie przechodzą



Ryc. 10.3. Skrzyżowane polaryzatory blokują wszystkie fale

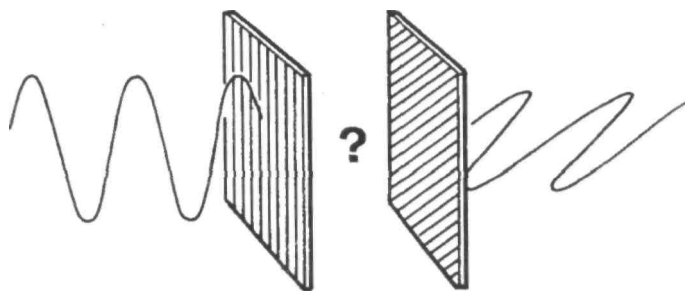
Możliwe są dwa rodzaje polaryzacji kołowej, lewo- i prawostronna. Liniowo spolaryzowane światło, w którym wszystkie fotony trzymają swe włócznie pod tym samym kątem, może zostać wytworzone przez odbicie w odpowiednich warunkach albo przez przepuszczenie zwykłego światła przez substancję, która, podobnie jak płytka polaroidu, przepuszcza tylko określony kierunek polaryzacji. Światło spolaryzowane może zostać użyte do zweryfikowania poprawności kwantowego obrazu świata, raz jeszcze pokazując działanie kwantowych reguł nieoznaczoności.

Podobnie jak spin cząstki na poziomie kwantowym polaryzacja fotonu w określonym kierunku jest także własnością typu „tak/nie”. Albo jest on spolaryzowany w danym kierunku - powiedzmy,

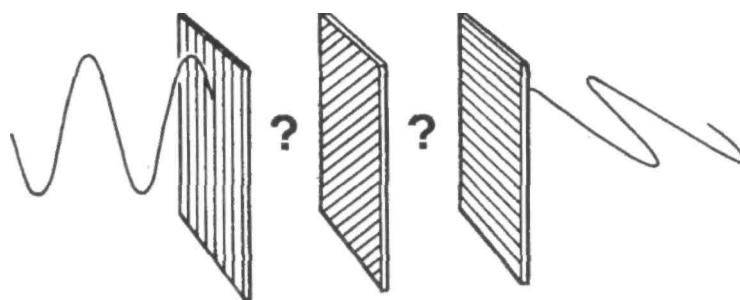
pionowo - albo nie. Tak więc fotony, które przejdą przez jedną żaluzję, powinny zostać zablokowane przez drugą, która jest ustawiona pod kątem prostym do pierwszej. Jeżeli pierwszy polaryzator przypomina poziomo ustawione listwy żaluzji, to drugi wygląda jak pionowe kołki w płocie. Jest oczywiste, że dwa „skrzyżowane” w ten sposób polaryzatory blokują wszelkie światło. Co się jednak stanie, gdy tak ustawimy drugą płytkę polaryzującą, aby jej „listwy” utworzyły kąt 45° z „listwami” pierwszej? Fotony padające na drugą płytkę są przekręcone o 45° w stosunku do właściwego kierunku i w klasycznym opisie powinny zostać zablokowane. Jednak opis kwantowy jest inny - każdy foton ma pięćdziesięcioprocentowa szansę na przejście przez drugi polaryzator, więc oczywiście połowa z nich przechodzi. Teraz dzieje się rzecz naprawdę dziwna. Te fotony, które przeszły, są w efekcie przekręcone - spolaryzowane pod kątem 45° w stosunku do pierwszego polaryzatora. Co się z nimi stanie, gdy padną na trzeci polaryzator ustawiony pod kątem prostym do pierwszego? Kąt prosty wynosi 90° , więc muszą one być ustawione pod kątem 45° do tego trzeciego polaryzatora. Tak jak poprzednio połowa z nich przechodzi.

Zatem przez dwa skrzyżowane polaryzatory światło nie przechodzi. Jeśli jednak umieścimy pomiędzy nimi trzeci, ustawiony pod kątem 45° do obu, to jedna czwarta natężenia światła przepuszczonego przez pierwszy polaryzator przedostanie się przez pozostałe dwa. Wygląda to tak, jakbyśmy ustawili dwa płoty, które wspólnie ze stuprocentową skutecznością bronią dzikim zwierzętom dostępu na teren naszej posesji, ale dla wszelkiej pewności zdecydowaliśmy się postawić pomiędzy tamtymi dwoma trzeci płot. Ku naszemu zdumieniu okazało się, że niektóre zwierzęta, które podwójny płot zatrzymywał, bez trudności przedostają się przez płot potrójny. Zmieniając ustawienie eksperymentu, zmieniamy naturę kwantowej rzeczywistości. Ustawiając pod różnymi kątami polaryzatory, mierzymy różne składowe wektora polaryzacji światła, a każdy nowy pomiar niszczy informację, którą uzyskaliśmy we wszystkich poprzednich pomiarach.

To prowadzi bezpośrednio do nowej wersji doświadczenia EPR. Zamiast z cząstkami materii mamy do czynienia z fotonami, ale podstawowa zasada pozostaje ta sama.



Ryc. 10.4. Dwa polaryzatory ustawione pod kątem 45° przepuszczają połowę fal, które przeszły przez pierwszy z nich!



Ryc. 10.5. Trzy polaryzatory (parami pod kątem 45°) przepuszczają czwartą część fal, które przeszły przez pierwszy z nich - mimo że nic nie przejdzie, jeżeli usunie się środkowy polaryzator

Wyobraźmy sobie jakiś proces atomowy, w którym powstają dwa fotony biegnące w przeciwnych kierunkach. Istnieje wiele rzeczywistych procesów, w których tak się dzieje i zawsze w takiej sytuacji polaryzacje obu fotonów są ze sobą skorelowane. Dla uproszczenia przyjmujemy, że w naszych eksperymentach myślowych obie polaryzacje muszą być takie same. Dłuższą chwilę po opuszczeniu źródła przez fotony decydujemy się na pomiar polaryzacji jednego z nich. Wybór kierunku, wzdłuż którego ustawimy nasz polaryzator, jest absolutnie dowolny. Foton ma określoną szansę na przejście przez nasz polaryzator i jeśli przejdzie, to będziemy wiedzieć, czy jego polaryzacja dla tego konkretnego kierunku jest „tak” lub „nie”. Wiemy także, że, daleko stąd, drugi foton jest spolaryzowany w ten sam sposób. Skąd jednak ten drugi foton wie o tym? W jaki sposób potrafi zatroszczyć się o to, aby pokonać przeszkodę, przez którą przeszedł pierwszy foton, albo zatrzymać się na tej, na której tamten się zatrzymał? Mierząc polaryzację pierwszego fotonu, dokonujemy kolapsu funkcji falowej nie tylko tego jednego fotonu, ale także drugiego, daleko stąd, w tym samym momencie.

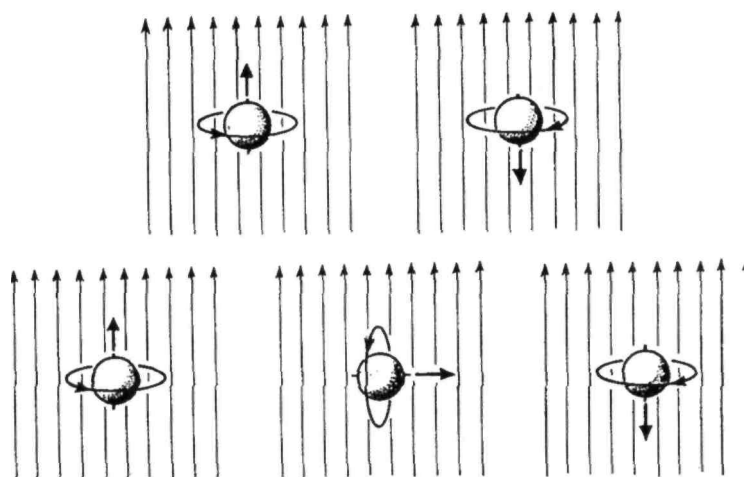
Mimo różnic w szczegółach jest to jednak ta sama zagadka, którą postawili Einstein i jego współpracownicy jeszcze w latach trzydziestych. Jedno rzeczywiste doświadczenie jest znacznie więcej warte niż pół wieku dywagacji o charakterze eksperymentów myślowych. Sposób zmierzenia efektów tego widmowego działania na odległość zaproponował John Bell.

Test Bella

Bernard d'Espagnat z uniwersytetu w Paryżu jest teoretykiem, który, podobnie jak David Bohm, poświęcił wiele uwagi i czasu implikacjom eksperymentów z gatunku EPR. We wspomnianym wyżej artykule w „Scientific American” oraz w swoim przyczynku do tomu *The Physicists Conception of Nature*, wydanego pod redakcją J. Mehry, d'Espagnat wyłożył podejście Bella do zagadki EPR, które opiera się na trzech podstawowych założeniach. Po pierwsze, obiekty we wszechświecie istnieją niezależnie od tego, czy je obserwujemy czy nie; po drugie, mamy prawo wyciągać wnioski z konsyistentnych obserwacji lub eksperymentów; po trzecie, żadne działanie nie przemieszcza się szybciej niż prędkość światła - dla tego warunku stosowane jest określenie „lokalność”. Powyższe trzy warunki łącznie stanowią podstawę poglądu na świat zwanego lokalnym realizmem.

Test Bella za punkt wyjścia przyjmuje założenie o lokalnym realizmie. W wersji doświadczenia EPR ze spinem protonów eksperymentator nigdy nie może poznać wszystkich trzech składowych spinu jednej cząstki, ale może zmierzyć dowolną z nich. Jeżeli trzy składowe nazwiemy odpowiednio X , Y i Z , to za każdym razem, gdy pomiar składowej X dla jednej cząstki daje wartość $+1$, to dla drugiej cząstki wynik pomiaru X wynosi -1 , i tak samo dla pozostałych składowych. Możemy wszakże zmierzyć składową X jednej cząstki oraz Y (albo Z , ale nie obie) drugiej, i dzięki temu uzyskać informację o dwóch składowych (X i Y) obu cząstek.

Realizacja tego pomysłu, nawet w teorii, nie jest łatwa, gdyż w grę wchodzi pomiar wielu przypadkowo ustawionych spinów dużej liczby par protonów i odrzucanie tych wyników, które dotyczą tej samej składowej dla obu cząstek z pary. W zasadzie jednak jest to wykonalne i w rezultacie daje eksperymentatorom wyniki, w których pary spinów są określone dla pary protonów i mogą być pogrupowane w zestawy XY , XZ i YZ , odpowiadające pomiarom odpowiednich składowych całkowitego spinu.



Ryc. 10.6. Cząstki z połówkowym spinem mogą ustawić się albo równolegle, albo antyrównolegle do linii pola magnetycznego (ryc. górna). Cząstki z całkowitym spinem mogą także ustawić się poprzecznie do linii pola (ryc. dolna)

W swojej klasycznej publikacji z 1964 roku Bell wykazał, że jeżeli wykona się taki eksperyment, to zgodnie z punktem widzenia lokalnego realizmu liczba par XY , dla których obie składowe mają wynik dodatni ($X^+ Y^+$), musi być zawsze mniejsza niż liczba połączonych par XZ i YZ , dla których wszystkie pomiary dały wynik dodatni ($X^+ Z^+$ plus $Y^+ Z^+$). Rachunek wynika bezpośrednio z oczywistego faktu, że jeśli pomiar spinu protonów da, powiedzmy, wartości X^+ i Y^+ , to całkowity spin musi wynosić albo $X^+ Y^+ Z^+$, albo $X^+ Y^+ Z^-$. Reszta wynika z matematycznie prostych argumentów opartych na teorii zbiorów. Jednak w teorii kwantowej reguły matematyczne są inne i ten sam rachunek wykonany zgodnie z tymi regułami daje przeciwny wynik: liczba par $X^+ Y^+$ jest w i ę k s z a , a nie mniejsza niż suma par $X^+ Z^+$ i $Y^+ Z^+$

Obliczenia zostały pierwotnie wykonane przy założeniu lokalnego realizmu, więc ich konwencjonalne sformułowanie określa pierwszą nierówność jako „nierówność Bella”. Jeżeli nierówność Bella nie jest spełniona, to lokalny realizm jest fałszywy, a teoria kwantowa pomyślnie przechodzi kolejny test.

Dowód

Test powinien się równie dobrze odnosić do pomiarów spinu cząstek materialnych, które są bardzo trudne do wykonania, jak i do pomiarów polaryzacji fotonów, które także nie są łatwe, ale łatwiejsze niż doświadczenia spinowe. Fotony mają zerową masę, poruszają się z prędkością światła i nie mają poczucia upływu czasu, więc niektórzy fizycy nie są pewni, jak należy interpretować wyniki eksperymentów z fotonami. Nie jest jasne, jaki sens ma dla fotonu pojęcie lokalności. Większość dotychczasowych doświadczalnych testów nierówności Bella opiera się na pomiarach polaryzacji fotonów, więc jest niezwykle istotne, że jedyny jak dotąd test wykonany na spinach protonów daje wyniki niezgodne z nierównością Bella i tym samym podtrzymuje kwantowy punkt widzenia na świat.

Doświadczenie przeprowadzone w 1976 roku w Ośrodku Badań Nuklearnych w Saclay we Francji nie było pierwszą próbą weryfikacji nierówności Bella, ale bardzo dokładnie naśladowało pierwotny eksperyment myślowy EPR. Polegało ono na strzelaniu protonami o niskiej energii w tarczę o dużej koncentracji atomów wodoru. Gdy proton trafia w jądro atomu wodoru - czyli w inny proton - obie cząstki oddziałują poprzez stan singletowy i składowe ich spinów mogą być zmierzone. Tego rodzaju pomiary nastroczają ogromnych trudności. Tylko niektóre protony są rejestrowane przez detektory, a nawet gdy to się zdarzy, to - w odróżnieniu od idealnego świata eksperymentów myślowych - nie zawsze da się jednoznacznie zarejestrować składowe ich spinów. Mimo to wyniki tego francuskiego eksperymentu jasno pokazują, że lokalny realizm jest fałszywy.

Pierwsze testy nierówności Bella przeprowadzono na uniwersytecie w Berkeley w Kalifornii przy użyciu fotonów; ich wyniki zostały opublikowane w 1972 roku. Do roku 1975 wykonano sześć testów, z których cztery dały wyniki sprzeczne z nierównością Bella. Niezależnie od wątpliwości dotyczących znaczenia lokalności dla fotonów jest to dowód na korzyść mechaniki kwantowej, zwłaszcza ze względu na fakt, że w eksperymentach zastosowano dwie zasadniczo różne techniki. We wcześniejszej wersji eksperymentu fotony pochodziły z atomów wapnia albo rtęci, które były wzbudzane przez światło lasera⁹³ do wybranego stanu wzbudzonego, z którego droga w dół prowadzi przez dwa przejścia - najpierw do innego, położonego niżej stanu wzbudzonego, a dopiero potem do stanu podstawowego - a każde przejście daje jeden foton. Fotony produkowane w serii przejść wybranej na potrzeby tego eksperymentu mają skorelowane polaryzacje, można je zatem analizować przy użyciu liczników fotonowych ustawionych za filtrami polaryzacyjnymi.

⁹³ Nawet tutaj napotykamy ślad problemów, które przez tak długi czas niepokoiły Bohra. Realne są tylko wyniki eksperymentów, a sposób ich przeprowadzenia wpływa na to, co mierzymy. Oto mamy fizyków, którzy w latach osiemdziesiątych używają wiązki lasera jako narzędzia codziennego użytku, służącego im do przepompowania atomów do stanu wzbudzonego. Możemy używać tego narzędzia tylko dzięki temu, że wiemy, co to są stany wzbudzone i mamy pod ręką kwantową książkę kucharską, ale jedynym celem całego eksperymentu jest weryfikacja mechaniki kwantowej - teorii, na podstawie której została napisana książka kucharska! Nie chcę sugerować, że eksperymenty są pozbawione sensu. Możemy wyobrazić sobie inne sposoby wzbudzania atomów przed wykonaniem pomiarów, a wszystkie one prowadzą do tego samego rezultatu. Wszakże, podobnie jak codzienne myślenie poprzednich pokoleń fizyków było uwarunkowane przez stosowanie przez nich, powiedzmy, wag sprężynowych i linijek, obecne pokolenie pozostaje - czasem znacznie bardziej niż zdajemy sobie z tego sprawę - pod wpływem narzędzi kwantowych.

Filozofowie mogą podjąć kwestię znaczenia rezultatów doświadczenia Bella w sytuacji, gdy do konstrukcji eksperymentu służą procesy kwantowe, ale ja pozostaję przy wersji Bohra - dostajemy taki wynik, jaki widzimy, nic innego nie jest realne.

W połowie lat siedemdziesiątych przeprowadzono pomiar, wykorzystując nieco inną technikę, w której fotony były promieniami gamma powstającymi w procesie anihilacji pary elektron-pozytron. Jak zawsze polaryzacje fotonów muszą być skorelowane. Tutaj również, gdy zmierzy się te polaryzacje, rezultaty nie spełniają nierówności Bella.

Tak więc z siedmiu pierwszych testów nierówności Bella pięć dało wyniki przemawiające za mechaniką kwantową. W artykule opublikowanym w „Scientific American” d'Espagnat podkreśla, że jest to silniejszy dowód na korzyść teorii kwantowej, niż mogłoby się wydawać na pierwszy rzut oka. Ze względu na charakter tych eksperymentów i trudności w ich przeprowadzeniu „najróżniejsze systematyczne błędy w konstrukcji eksperymentu mogłyby zniszczyć dowód istnienia korelacji [...] z drugiej strony trudno wyobrazić sobie błąd eksperymentalny, który mógłby wytworzyć fałszywe korelacje w pięciu niezależnych doświadczeniach. Co więcej, rezultaty tych eksperymentów nie tylko nie spełniają nierówności Bella, ale nie spełniają jej dokładnie w stopniu przewidywanym przez mechanikę kwantową”.

Od połowy lat siedemdziesiątych przeprowadzano coraz więcej testów zaprojektowanych w celu uzupełnienia braków koncepcji eksperymentu. Części aparatury powinny być ustawione dostatecznie daleko od siebie, aby ewentualny „sygnał” pomiędzy detektorami, który mógłby dać fałszywą korelację, musiał podróżować szybciej niż światło. Także przy takim ustawieniu nierówności Bella nie są spełnione. Może jednak korelacja pojawia się, ponieważ fotony „wiedzą” już w momencie narodzin, jaki rodzaj aparatury został ustawiony do złapania ich w pułapkę. Aby to wyjaśnić, nie ma potrzeby odwoływania się do sygnałów szybszych od światła, jeżeli układ doświadczalny został ustawiony wcześniej i obejmująca całość układu funkcja falowa wpływa na stan fotonów w momencie ich powstania. Ostateczny, jak dotąd, test nierówności Bella uwzględnia zmianę struktury eksperymentu w trakcie lotu fotonów, w podobny sposób jak eksperyment z dwiema szczelinami w myślowej wersji Wheelera może zostać zmieniony podczas lotu fotonu. Wykonując test Bella w takiej konfiguracji, zespół Alaina Aspecta z uniwersytetu w Paryżu zanegował w 1982 roku ostatnią istotną hipotezę, dzięki której mogłaby się bronić teoria lokalnego realizmu.

Aspect i jego koledzy już wcześniej przeprowadzali doświadczenia weryfikujące nierówności Bella, używając fotonów z kaskady, w których nierówność także nie była spełniona. Usprawnienie, które wprowadzili, polegało na wykorzystaniu przełącznika, który może zmienić kierunek przechodzącej przezeń wiązki światła. Dzięki temu wiązka może zostać skierowana do jednego z dwóch filtrów polaryzacyjnych, z których każdy mierzy inny kierunek polaryzacji i każdy ma za sobą własny detektor fotonów. Kierunek wiązki światła przechodzącej przez przełącznik może zostać zmieniony niezwykle szybko, co 10 nanosekund (10 miliardowych części sekundy, 10×10^{-9} s), przez automatyczne urządzenie, które wytwarza pseudolosowy sygnał. Foton potrzebuje 20 nanosekund, aby dotrzeć od atomu, w którym się rodzi w trakcie trwania eksperymentu, do detektora, nie ma więc żadnej możliwości, aby informacja o ustawieniu eksperymentu mogła się

przedostać z jednej części układu do drugiej i wpłynąć na wynik pomiaru - jeżeli nie przenosi się ona szybciej niż światło.

Co to oznacza?

Eksperyment jest niemal idealny; przełączanie wiązki światła nie jest wprawdzie całkowicie losowe, ale odbywa się niezależnie dla obu wiązek fotonów. Jedyna poważna luka, jaka wciąż pozostaje, to fakt, że większość fotonów w ogóle nie jest rejestrowana, ze względu na zbyt małą wydajność detektorów. Można więc argumentować, że zarejestrowane zostają tylko te fotony, które nie spełniają nierówności Bella, a pozostałe spełniałyby ją, gdybyśmy tylko zdołali je złapać. Jednak eksperymenty, które badałyby tę mało prawdopodobną możliwość, nie są na razie brane pod uwagę, a argument ten wydaje się skrajnie desperacki. Po ogłoszeniu wyników przez zespół Aspecta tuż przed Bożym Narodzeniem 1982 roku⁹⁴ nikt już nie wątpi, że test Bella potwierdza przewidywania teorii kwantowej. Wyniki tego eksperymentu, najlepsze z możliwych do uzyskania przy dzisiejszym stanie techniki, naruszają nierówności w większym stopniu niż którykolwiek z poprzednich testów i zgadzają się bardzo dobrze z przewidywaniami mechaniki kwantowej. Jak powiedział d'Espagnat: „Przeprowadzone ostatnio eksperymenty zmusiłyby Einsteina do zmiany jego koncepcji natury w punkcie, który zawsze uważał za zasadniczy [...] możemy bezpiecznie stwierdzić, że nielokalność [non-separability] jest obecnie jednym z najpewniejszych ogólnych pojęć w fizyce”⁹⁵.

Nie oznacza to, że istnieje szansa na przesyłanie sygnałów szybciej niż prędkość światła. Nie ma możliwości przekazania tą drogą użytecznej informacji, ponieważ nie ma sposobu na powiązanie w tym procesie zdarzenia, które jest przyczyną, ze zdarzeniem, które jest skutkiem. Zasadniczy dla tego efektu jest fakt, że odnosi się on do zdarzeń, które mają wspólną przyczynę - anihilacja pary elektron-pozytron; powrót elektronu do stanu podstawowego; rozdzielenie pary protonów ze stanu singletowego. Możemy sobie wyobrazić dwa detektory ustawione daleko od siebie w przestrzeni, fotony z jakiegoś centralnie położonego źródła lecące w kierunku obu detektorów oraz jakąś subtelną technikę zmieniającą polaryzację jednej z wiązek fotonów w taki sposób, że obserwator daleko przy drugim detektorze widzi zmiany polaryzacji drugiej wiązki. Jakiego rodzaju sygnał daje tego rodzaju zmiana polaryzacji? Pierwotne polaryzacje - albo spiny - cząstek w wiązce są rezultatem losowych procesów kwantowych i same w sobie nie niosą żadnej informacji. Obserwator przy drugim detektorze zobaczy jedynie inne losowe fluktuacje, różne od losowych fluktuacji, które widziałby bez chytrych manipulacji przy pierwszym polaryzatorze! Losowe fluktuacje nie niosą żadnej informacji, więc cała zabawa byłaby zupełnie bezużyteczna. Sygnał jest zawarty w różnicy między dwiema losowymi fluktuacjami, ale pierwsza z nich nigdy nie istniała w rzeczywistym świecie, nie ma więc sposobu na wydostanie informacji.

Nie bądźmy jednak zanadto rozczarowani, gdyż eksperymenty Aspecta oraz jego poprzedników rzeczywiście stwarzają obraz świata zasadniczo różny od tego, który nam podsuwa zdrowy

⁹⁴ „Physical Review Letters”, t. 49, s. 1804.

⁹⁵ J. Mehra (red.), *The Physicist's Conception of Nature*, s. 734.

rozsądek. Mówią nam, że cząstki, które kiedykolwiek były razem i oddziaływały ze sobą, w pewnym sensie pozostają częściami jednego systemu, w ramach którego reagują wspólnie na kolejne oddziaływania. Prawie wszystko, co widzimy, dotykamy i czujemy, składa się z układów cząstek, które były obiektami oddziaływań z innymi cząstkami w ciągu minionego czasu, aż do wielkiego wybuchu, w którym świat powstał w takiej postaci, w jakiej go widzimy. Atomy w moim ciele składają się z cząstek, które niegdyś tłoczyły się w ognistym zarodku wszechświata w bezpośredniej bliskości cząstek, które obecnie są częścią odległej gwiazdy, oraz cząstek, które tworzą ciało żywej istoty na jakiejś odległej nieznannej planecie. Powiem więcej, atomy, które tworzą moje ciało, niegdyś tłoczyły się w bezpośredniej bliskości i oddziaływały z cząstkami, które teraz tworzą Twoje ciało. Jesteśmy w takim samym stopniu częściami jednego systemu jak dwa fotony biegnące ze źródła w eksperymencie Aspecta.

Teoretycy tacy jak d'Espagnat i David Bohm twierdzą, że musimy przyjąć do wiadomości fakt, iż dosłownie wszystko jest połączone z wszystkim i jedynie holistyczne podejście do wszechświata może wyjaśnić takie zjawiska jak ludzka świadomość.

Za wcześniej jeszcze, aby fizycy i filozofowie, zmierzający ku jakiejś nowej koncepcji świadomości i nowemu modelowi wszechświata, mogli stworzyć zadowalający zarys jego prawdopodobnej formy, a spekulacje co do wielu potencjalnych możliwości wykraczają poza ramy tej książki. Mogę jednak dać przykład z mojego własnego podwórka, głęboko zakorzeniony w solidnej tradycji fizyki i astronomii. Do wielkich zagadek należy bezwładność, opór stawiany przez ciało zmianom jego ruchu (nie samemu ruchowi). W pustej przestrzeni każde ciało porusza się wzdłuż linii prostej ze stałą prędkością, dopóki nie zostanie popchnięte przez jakąś zewnętrzną siłę - jest to jedno z wielkich odkryć Newtona. Wartość tej siły potrzebna do poruszenia ciała zależy od tego, ile zawiera ono materii. Jednak skąd ciało „wie”, że porusza się ze stałą prędkością wzdłuż linii prostej - w stosunku do czego mierzy swoją prędkość? Od czasów Newtona filozofowie byli w pełni świadomi, że standardem, w stosunku do którego wydaje się mierzona bezwładność, jest układ odniesienia związany z tak zwanymi gwiazdami stałymi, aczkolwiek dzisiaj mówilibyśmy raczej o odległych galaktykach. Wirująca w przestrzeni Ziemia, długie wahadło Foucaulta w rodzaju tych, które widzimy w tak wielu muzeach nauki, kosmonauta lub atom - wszyscy oni „wiedzą”, jaki jest średni rozkład materii we wszechświecie.

Nikt nie wie, dlaczego ani jak działa ten efekt. Prowadzi on do pewnych intrygujących, aczkolwiek bezowocnych spekulacji. Gdyby w pustym wszechświecie była tylko jedna cząstka, nie mogłaby mieć bezwładności, gdyż nie miałaby w stosunku do czego mierzyć swojego ruchu lub oporu wobec ruchu. Jednak gdyby w pustym wszechświecie istniały dwie cząstki, to czy miałyby taką samą bezwładność, jaką mają w naszym? Gdybyśmy mogli za pomocą magicznej sztuczki usunąć z naszego wszechświata połowę materii, to czy reszta nadal miałaby tę samą bezwładność czy dwukrotnie mniejszą? (A może dwukrotnie większą?) Jest to dziś równie wielka zagadka jak trzysta lat temu, ale śmierć lokalnego realizmu być może da nam klucz do jej rozwiązania. Jeżeli wszystko, co kiedykolwiek oddziaływało w wielkim wybuchu nadal utrzymuje łączność z wszystkimi

obiektami tego oddziaływania, to każda cząstka każdej gwiazdy w każdej galaktyce „wie” o istnieniu każdej innej cząstki. Bezwładność przestaje być zagadką dla kosmologów i relatywistów, wchodzi bowiem w zakres mechaniki kwantowej.

Czy brzmi to paradoksalnie? Richard Feynman zwięźle podsumował sytuację w swoich *Wykładach*: „»Paradoks« jest tylko konfliktem między rzeczywistością a naszymi oczekiwaniami co do tego, jaka ta rzeczywistość »powinna być«”. Czy jest to jałowa dyskusja jak debata o liczbie aniołów, które mogą tańczyć na główce od szpilki? Na początku 1983 roku, zaledwie kilka tygodni po publikacji rezultatów zespołu Aspecta, naukowcy z uniwersytetu w Sussex w Anglii ogłosili wyniki eksperymentów, które nie tylko dają niezależne potwierdzenie łączności obiektów na poziomie kwantowym, ale także ukazują obszar praktycznych zastosowań, w tym także nową generację komputerów - o tyle doskonalszych od obecnej technologii ciałostalowej, o ile radio tranzystorowe jest doskonalsze od semafora w roli urządzenia sygnalizacyjnego.

Potwierdzenia i zastosowania

Zespół z Sussex, pod kierownictwem Terry'ego Clarka, podszedł do problemu wykonania pomiarów rzeczywistości kwantowej od drugiej strony. Zamiast próbować skonstruować eksperymenty, które działają w skali typowej dla obiektów kwantowych - w skali atomów lub jeszcze mniejszej - podjęto próbę stworzenia „cząstek kwantowych” o wymiarach zbliżonych do konwencjonalnych urządzeń pomiarowych. Ich technika opiera się na własności nadprzewodnictwa i wykorzystuje pierścien z materiału nadprzewodzącego, o średnicy około pół centymetra. W jednym miejscu pierścien ma zwężenie, którego pole przekroju wynosi zaledwie jedną dziesięciomilionową część centymetra kwadratowego. To „słabe złącze”, wynalezione przez Briana Josephsona (tego od złącza Josephsona) powoduje, że nadprzewodzący pierścien działa jak cylinder z otwartym denkiem, na podobieństwo rury organów albo blaszanej puszki z usuniętymi obiema pokrywami. Fale Schrödingera, opisujące zachowanie nadprzewodzących elektronów w pierścieniu, wyglądają jak stojąca fala dźwiękowa w rurze organowej. Mogą one być „dostrojone” przez zastosowanie zmiennego pola elektromagnetycznego o częstotliwości radiowej. W rezultacie tych subtelnych zabiegów fala elektronowa w całym obszarze pierścienia odzwierciedla pojedynczą cząstkę kwantową, a przez zastosowanie super-czułego detektora częstotliwości radiowych zespół badawczy może obserwować efekty wywołane przez przejścia kwantowe tej „cząstki”. Z punktu widzenia obserwujących te efekty fizyków można powiedzieć, że jest to pojedyncza cząstka kwantowa o średnicy pół centymetra - podobny, ale jeszcze bardziej szokujący przedstawiciel świata kwantów niż wspomniany uprzednio mały pojemnik z nadciekłym helem.

Eksperyment umożliwia bezpośrednie pomiary pojedynczych przejść kwantowych, a także dostarcza dalszych wyraźnych dowodów na nielokalność. Elektrony w nadprzewodniku zachowują się jak jeden bozon, więc fala Schrödingera, która podlega kwantowemu przejściu, jest rozciągnięta wokół całego pierścienia. Przejście tego pseudobozonego zachodzi w jednym momencie. Nic nie wskazuje na to, aby przejście zaczynało się w jednej części pierścienia, a druga doganiała pierwszą dopiero wtedy, gdy poruszający się z prędkością światła sygnał miał dość

czasu, aby obiec cały pierścień i pobudzić resztę „cząstki” do działania. Pod pewnymi względami eksperyment ten jest jeszcze bardziej przekonujący niż test nierówności Bella wykonany przez zespół Aspecta, opierający się na przesłankach, które, chociaż matematycznie jednoznaczne, nie są łatwe do zrozumienia dla laika. Znacznie łatwiej jest zrozumieć koncepcję pojedynczej „cząstki”, która ma pół centymetra średnicy, a mimo to zachowuje się jak obiekt kwantowy i w sposób natychmiastowy - i w całości - reaguje na wszelkie bodźce zewnętrzne.

Clark i jego koledzy pracują już nad następnym logicznym etapem. Mają nadzieję, że uda im się skonstruować większy „makroatom”, w formie cylindra o długości 6 metrów. Jeżeli urządzenie to będzie reagować na bodźce zewnętrzne w taki sam sposób jak słabe złącze Josephsona, to może rzeczywiście uczyniony zostanie wyłom, który z czasem pozwoli na komunikację szybszą od światła. Detektor na jednym końcu cylindra, mierzący jego stan kwantowy, zareaguje natychmiast na zmianę stanu wywołaną przez szturchnięcie drugiego końca cylindra. Dla konwencjonalnych zastosowań w telekomunikacji nie będzie wiele pożytku z sześciometrowego cylindra - nie potrafimy zbudować makroatomu sięgającego stąd do Księżyca, aby wyeliminować to irytujące opóźnienie w łączności między ładownikiem księżycowym a naziemnym ośrodkiem kontroli lotów - lecz będzie on miał bezpośrednie praktyczne zastosowania w innej dziedzinie.

Jednym z kluczowych czynników ograniczających możliwości najbardziej zaawansowanych współczesnych komputerów jest prędkość, z jaką elektrony mogą przedostawać się po obwodach od jednego elementu do drugiego. Związane z tym opóźnienia czasowe są bardzo małe, rzędu nanosekund, ale bardzo znaczące. Natychmiastowa komunikacja na wielkie odległości nie wydaje się bliska technicznej realizacji, ale możliwość zbudowania komputerów, w których wszystkie podzespoły reagują w sposób natychmiastowy na zmianę stanu jednego z nich jest realna w świetle wyników zespołu z Sussex. Perspektywa ta ośmieliła Terry'ego Clarka do stwierdzenia, że „gdy reguły eksperymentu zostaną przełożone na obwody elektroniczne, niewiarygodnie szybka elektronika dwudziestego wieku będzie wyglądać jak semafor w porównaniu z tą technologią”⁹⁶.

Tak więc wyniki eksperymentów nie tylko całkowicie obroniły interpretację kopenhaską, ale wydaje się, że mogą przynieść zastosowania tak dalece przekraczające to, co mechanika kwantowa już nam dała, jak ona sama w swoim czasie prześcignęła możliwości klasycznej techniki. Mimo to interpretacja kopenhaska nadal pozostaje intelektualnie niezadowolająca. Co dzieje się z tymi wszystkimi widmowymi światami kwantowymi, które zapadają się wraz ze swoimi funkcjami falowymi, gdy wykonujemy eksperyment na układzie subatomowym? W jaki sposób kłębiące się byty, nie mniej i nie więcej rzeczywiste niż ten, który w rezultacie staje się wynikiem pomiaru, po prostu znikają, gdy pomiar zostaje wykonany? Najlepsza odpowiedź brzmi, że te wykluczające się rzeczywistości nie znikają i że kot Schrödingera może być równocześnie żywy i

⁹⁶ Cytat z „Guardiana” z 6 stycznia 1983. Kiedy przygotowywałem ten rozdział do druku, pojawiły się wiadomości o wynikach prac badawczych w tej samej dziedzinie w Laboratoriach Bella, gdzie testuje się technologię złącza Josephsona jako nowego, szybkiego „przełącznika” w konstrukcji podzespołów komputerowych. Przełączniki te, wykorzystujące jedynie „konwencjonalne” złącze Josephsona, działają dziesięć razy szybciej od standardowych układów stosowanych w produkcji komputerów. Informacje o tym osiągnięciu nieprędko zejdą z pierwszych stron gazet i zapewne w najbliższej przyszłości znajdą praktyczne zastosowania. Nie mieszajmy wszakże jednego z drugim - możliwości, o których pisze Clark, są wprawdzie bardziej odległe w czasie i być może nie zostaną zrealizowane przed końcem obecnego stulecia, lecz potencjalnie stanowią dalszy krok do przodu.

martwy, ale w dwóch (lub więcej) różnych światach. Interpretacja kopenhaska, wraz ze swoimi praktycznymi konsekwencjami, całkowicie zawiera się w pełniejszej interpretacji rzeczywistości, znanej jako teoria wielu światów.

Rozdział jedenasty

Wiele światów

Do tej pory starałem się w tej książce być bezstronny - przedstawiłem historię kwantów we wszystkich jej aspektach i pozwoliłem, by fakty mówiły za siebie. Nadszedł czas, żeby ujawnić własne preferencje. W tym końcowym rozdziale porzucam wszelkie pozory neutralności, aby opisać interpretację mechaniki kwantowej, którą uważam za najbardziej satysfakcjonującą zarówno z formalnego, jak i z estetycznego punktu widzenia. Nie jest to pogląd większości. Tych fizyków, którzy w ogóle zwracają sobie głowę tym problemem, zadowolają zapadające się funkcje falowe interpretacji kopenhaskiej. Jednak teoria wielu światów jest uznana przez mniejszość. Pogląd ten ma zaletę, że zawiera w sobie interpretację kopenhaską. Niewygodną cechą tej interpretacji, która nie pozwoliła jej podbić świata fizyki, jest fakt, że implikuje ona wiele innych światów - być może nieskończoną liczbę - istniejących w pewien sposób w poprzek czasu obok naszej rzeczywistości, równoległe do naszego wszechświata, ale na zawsze od niego odciętych.

Kto obserwuje obserwatorów

Interpretacja mechaniki kwantowej znana pod nazwą teorii wielu światów wywodzi się z prac Hugh Everetta, który był doktorantem na uniwersytecie w Princeton w latach pięćdziesiątych. Zastanawiając się nad osobliwą właściwością interpretacji kopenhaskiej, która zmusza funkcje falowe do magicznego zapadania się, gdy są obserwowane, Everett omawiał rozmaite alternatywne podejścia z wieloma ludźmi, łącznie z Johnem Wheelerem, który zachęcił go do sformułowania własnej interpretacji w ramach pracy doktorskiej. Ten alternatywny punkt widzenia wywodzi się z prostego pytania, które jest logiczną kulminacją rozważania kolejnych kolapsów funkcji falowej w sytuacji, gdy wykonujemy doświadczenie w zamkniętym pomieszczeniu, wychodzimy z niego i oznajmiamy wynik czytelnikowi, który następnie opowiada o tym przyjacielowi w Nowym Jorku, który przekazuje to komuś innemu i tak dalej. Z każdym krokiem funkcja falowa staje się coraz bardziej złożona i obejmuje coraz więcej „realnego świata”, ale w każdej chwili alternatywne możliwości są równoprawnymi, nakładającymi się rzeczywistościami, dopóki nie pojawi się wieść o wyniku eksperymentu. Możemy sobie wyobrazić wiadomość rozprzestrzeniającą się w ten sposób na cały wszechświat, pozostający w stanie nakładających się funkcji falowych - alternatywnych rzeczywistości, które zapadają się dopiero wtedy, gdy są obserwowane. Ale kto obserwuje wszechświat?

Wszechświat jest z definicji zupełny i samowystarczalny. Zawiera w sobie wszystko, więc nie może istnieć zewnętrzny obserwator, który widzi obecność wszechświata i tym samym kolapsuje jego skomplikowaną sieć oddziałujących alternatywnych rzeczywistości w jedną funkcję falową. Jednym z możliwych rozwiązań tego dylematu jest pomysł Wheelera, że to świadomość - a więc my sami - jest owym kluczowym obserwatorem działającym poprzez odwrócony związek przyczynowy wstecz aż do wielkiego wybuchu, ale mamy tu do czynienia z błędnym kołem, z

argumentacją równie zagadkową jak sama zagadka, którą ma ona za zadanie rozwiązać. Wolałbym już raczej tezę solipsystów, że we wszechświecie istnieje tylko jeden obserwator, ja sam, i że to moje obserwacje są tym decydującym czynnikiem, który wykrystalizuje rzeczywistość z gąszczu kwantowych możliwości - skrajny solipsyzm jest jednak głęboko niezadowolającą filozofią dla kogoś, kogo uczestnictwo w sprawach tego świata polega na pisaniu książek dla innych ludzi. Interpretacja wielu światów Everetta jest inną, bardziej zadowolającą i pełniejszą możliwością.

Teoria Everetta zakłada, że nakładające się funkcje falowe całego wszechświata, te alternatywne rzeczywistości, których oddziaływanie wytwarza mierzalne efekty interferencyjne na poziomie kwantowym, nie zapadają się. Wszystkie one są równie rzeczywiste i istnieją w swoich własnych wymiarach superprzestrzeni (i superczasu). Gdy wykonujemy pomiar na poziomie kwantowym, proces obserwacji zmusza układ do dokonania wyboru jednej z możliwości, która tym samym staje się częścią tego, co widzimy jako „rzeczywisty” świat; akt obserwacji rozcina więzy, które łączą różne rzeczywistości i pozwala im podążać osobnymi drogami przez superprzestrzeń. Każda rzeczywistość zawiera swojego własnego obserwatora, który wykonał ten sam pomiar, ale otrzymał inną kwantową „odpowiedź” i teraz sądzi, że dokonał „kolapsu funkcji falowej” w jedną kwantową alternatywę.

Koty Schrödingera

Dosyć trudno jest pojąć sens podejścia Everetta, gdy mówimy o kolapsie funkcji falowej całego wszechświata; łatwiej zrozumieć, dlaczego jego teoria stanowi krok naprzód, jeżeli weźmiemy pod uwagę bardziej pospolity przykład. Nasze poszukiwania prawdziwego kota ukrytego wewnątrz paradoksalnego pudła Schrödingera nareszcie dobiegły końca, gdyż pudło to daje nam dokładnie taki przykład, jakiego potrzebujemy, aby zademonstrować potęgę teorii wielu światów w interpretacji mechaniki kwantowej. Niespodzianka polega na tym, że ślad prowadzi nie do jednego, lecz do dwóch realnych kotów.

Równania mechaniki kwantowej mówią nam, że wewnątrz pudła w myślowym eksperymencie Schrödingera istnieje wersja „żywa” i wersja „martwa” słynnego kota; obie wersje są równie rzeczywiste. Konwencjonalna interpretacja kopenhaska traktuje te dwie możliwości z innej perspektywy i mówi, że obie funkcje falowe są jednakowo nierzeczywiste, i że tylko jedna z nich wykrystalizuje się w rzeczywistość, gdy zajrzemy do środka pudła. Wersja Everetta uznaje równania kwantowe i mówi, że oba koty są rzeczywiste. Jest żywy kot i jest martwy kot, ale istnieją one w różnych światach. To nie tak, że radioaktywny atom wewnątrz pudła albo rozpadł się albo nie - on zrobił jedno i drugie. Zmuszony do podjęcia decyzji świat rozszczepił się na dwie wersje samego siebie, dwa pod każdym względem identyczne wszechświaty - z jednym wyjątkiem: w jednym z nich atom się rozpadł i kot zginął, podczas gdy w drugim atom się nie rozpadł i kot przeżył. To brzmi jak fantastyka naukowa, ale w istocie sięga znacznie głębiej, a oparte jest na równaniach matematycznych będących konsystentną i logiczną konsekwencją potraktowania mechaniki kwantowej dosłownie.

Poza fantastyką

Znaczenie opublikowanych w 1957 roku prac Everetta polega na tym, że swój absurdalny pomysł osadził on na solidnej podstawie matematycznej, stosując uznane metody teorii kwantowej. Co innego dywagować o naturze wszechświata, a co innego przekształcić te dywagacje w pełną i spójną teorię rzeczywistości. Everett nie był pierwszym autorem tego rodzaju spekulacji, aczkolwiek wydaje się, że stworzył swoje pomysły całkowicie niezależnie od jakichkolwiek wcześniejszych sugestii dotyczących wielokrotnych rzeczywistości i równoległych światów. Większość wcześniejszych spekulacji - których sporo namnożyło się po 1957 roku - pojawiła się na stronach książek fantastycznonaukowych. Najwcześniejszą wersję, jaką udało mi się wysledzić, znalazłem w *The Legion of Time* Jacka Williamsona, po raz pierwszy opublikowanym w odcinkach w 1938 roku⁹⁷.

Wiele opowieści fantastycznonaukowych jest osadzonych w „równoległych” rzeczywistościach, w których Południe wygrywa amerykańską wojnę secesyjną, hiszpańskiej Armadzie udaje się podbić Anglię i tak dalej. Niektórzy autorzy opisują przygody bohatera, który podróżuje w poprzek czasu od jednej rzeczywistości do innej; kilku opisuje, używając fagowskiego żargonu, w jaki sposób taki alternatywny świat może oddzielić się od naszego. W historii Williamsona mamy do czynienia z dwoma światami, z których żaden nie osiąga trwałej realności, dopóki pewne kluczowe zdarzenie nie zajdzie w kluczowym momencie w przeszłości, gdy drogi obu światów się rozchodzą (w tekście jest także „konwencjonalna” podróż w czasie, a sama akcja jest równie zapętlona jak jej uzasadnienie). W opowieści pobrzmiewa echo konwencjonalnej interpretacji kopenhaskiej wraz z zapadającą się funkcją falową, a wprawa, z jaką Williamson operuje nowymi ideami lat trzydziestych, uwidacznia się w następującym fragmencie, w którym jedna z postaci wyjaśnia:

Po podstawieniu fał prawdopodobieństwa za konkretne cząstki, linie świata obiektów nie są już wyraźnymi i jednoznacznymi trajektoriami, jakimi były do tej pory. Linie geodezyjne rozszczepiają się na nieskończenie wiele możliwych gałęzi pod wpływem kaprysów subatomowego indeterminizmu.

Świat Williamsona jest światem widmowych rzeczywistości, w których w wyniku heroiczych działań bohaterów i kluczowych decyzji podjętych w odpowiednich momentach jedne z nich zapadają się i znikają, a inne dostępują łaski trwałości. Świat Everetta jest jedną z wielu trwałych rzeczywistości, w której wszystkie światy są równie rzeczywiste i w której nawet herosi nie mogą przenosić się do sąsiedniej rzeczywistości. Wszakże wersja Everetta jest faktem naukowym, a nie fikcją literacką.

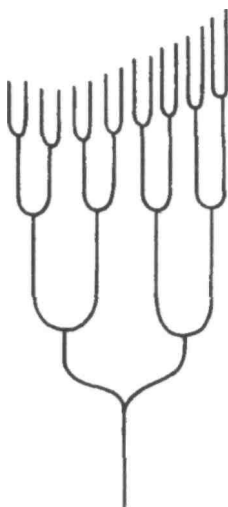
Powróćmy na chwilę do podstawowego eksperymentu fizyki kwantowej - do doświadczenia z dwiema szczelinami. Mimo że niewielu kwantowych kucharzy zdaje sobie z tego sprawę, nawet w ramach konwencjonalnej interpretacji kopenhaskiej wzór interferencyjny, który powstaje na ekranie, gdy tylko jedna cząstka przebiega przez układ doświadczalny, jest interpretowany jako interferencja dwóch alternatywnych rzeczywistości: w jednej z nich cząstka przechodzi przez otwór *A*, a w drugiej przez otwór *B*. Gdy popatrzymy na przegrodę z otworami, widzimy cząstkę

⁹⁷ Moja wcześniejsza książka *Timewarps* [Fałdy czasu] jest w całości poświęcona równoległym światom, ale zawiera tylko podstawową, niezbędną do dyskusji wiedzę o mechanice kwantowej.

przechodzącą przez jeden z nich i interferencja znika. W jaki jednak sposób cząstka decyduje, przez którą szczelinę ma przejść? W interpretacji kopenhaskiej decyduje przypadek, zgodnie z kwantowymi prawdopodobieństwami - Bóg gra w kości z wszechświatem. W interpretacji wielu światów cząstka nie musi podejmować żadnej decyzji. Postawiona przed wyborem na poziomie kwantowym nie tylko sama cząstka, ale cały wszechświat rozszczepia się na dwie wersje. W jednej cząstka przechodzi przez otwór *A*, w drugiej przez otwór *B*. W obu wszechświatach istnieje obserwator, który widzi cząstkę przechodzącą przez tylko jeden otwór, a od momentu rozszczepienia dwa światy są całkowicie i na zawsze rozdzielone i nie oddziałują ze sobą - dlatego na ekranie eksperymentu nie pojawia się obraz interferencyjny.

Pomóżmy ten pomysł przez liczbę kwantowych zdarzeń w każdej chwili w każdym miejscu wszechświata, a bez trudu zrozumiemy, dlaczego przeciętnemu fizykowi robi się słabo na samą myśl o tej teorii. Jednakże, jak pokazał Everett ćwierć wieku temu, jest to logiczny i spójny opis kwantowej rzeczywistości, niesprzeczny z żadnymi dowodami doświadczalnymi i obserwacyjnymi.

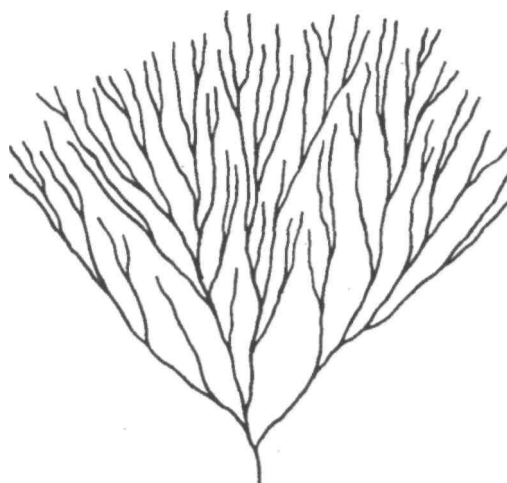
Mimo swej niepodważalnej matematyki interpretacja Everetta mechaniki kwantowej z 1957 roku zniknęła bez śladu w archiwum wiedzy naukowej. Jedna wersja pracy ukazała się w „Reviews of Modern Physics”⁹⁸, a równocześnie z nią Wheeler opublikował pracę, w której zwrócił uwagę na znaczenie wyników Everetta⁹⁹.



Ryc. 11.1. Określenie „równoległe światy” sugeruje istnienie obok siebie alternatywnych rzeczywistości w „superczasoprzestrzeni”. Jest to wizja fałszywa

⁹⁸ T. 29, s. 454.

⁹⁹ Tamże, s. 463.



Ryc. 11.2. Nieco lepszym obrazem jest wszechświat nieustannie rozszczepiający się jak gałęzie drzewa. Ta wizja jest jednak również fałszywa

Początkowo jednak pomysł był w zasadzie ignorowany, aż do momentu, gdy dziesięć lat później podjął go na nowo Bryce DeWitt z Uniwersytetu Północnej Karoliny.

Nie jest dla mnie jasne, dlaczego pomysł Everetta przyjęt się dopiero po tak długim czasie (jeszcze w latach siedemdziesiątych cieszył się bardzo umiarkowanym powodzeniem). Niezależnie od trudnej matematyki, w artykule w „Reviews of Modern Physics” Everett szczegółowo wyjaśnił, dlaczego nieprawdziwy jest argument, że rozszczepienie wszechświata na wiele światów nie może być prawdą, gdyż nie odczuwamy jego efektów. Wszystkie oddzielne elementy superpozycji stanów spełniają równanie falowe całkowicie niezależnie od istnienia innych elementów, a całkowity brak wpływu jednej gałęzi na inne implikuje, że żaden obserwator nie może być świadomy procesu rozszczepienia. Argument odwrotny przypomina stwierdzenie, że Ziemia nie może krążyć wokół Słońca, ponieważ musielibyśmy odczuwać jej ruch. „W obu wypadkach - mówi Everett - sama teoria przewiduje, że nasze doświadczenie będzie takie, jakie jest w rzeczywistości”.

Poza Einsteinem

W przypadku interpretacji wielu światów teoria jest koncepcyjnie prosta, przyczynowa i daje przewidywania zgodne z doświadczeniem. Wheeler starał się, jak mógł, aby ludzie zauważyli ten nowy pomysł:

Trudno jest wyjaśnić, do jakiego stopnia formuła „stanu względnego” odbiega od klasycznych pojęć. W historii fizyki niewiele jest wydarzeń, które początkowo wywoływały porównywalny niepokój: gdy Newton opisał grawitację za pomocą czegoś tak niedorzecznego jak działanie na odległość; gdy Maxwell opisał coś tak zwyczajnego jak działanie na odległość w kategoriach tak niezwykłych jak teoria pola; gdy Einstein odmówił uprzywilejowanego charakteru jakiegokolwiek układowi odniesienia... z całej historii fizyki nie da się zacytować nic równie szokującego z wyjątkiem ogólnej zasady względności, która mówi, że wszystkie nieosobliwe układy odniesienia są równoważne¹⁰⁰.

„Poza pomysłem Everetta - konkluduje Wheeler - nie dysponujemy spójną koncepcją, która by wyjaśniała, jak należy rozumieć kwantowanie takiego zamkniętego układu jak wszechświat w

¹⁰⁰ Tamże, s. 464.

ogólnej teorii względności". Opinia bardzo kategoryczna; interpretacja Everetta ma wszakże jeden defekt, który skutecznie hamuje próby podważenia ustalonej reputacji interpretacji kopenhaskiej w fizyce. Wersja wielu światów mechaniki kwantowej daje dokładnie te same przewidywania, co wersja kopenhaska, gdy ocenia się prawdopodobny wynik jakiegokolwiek doświadczenia lub obserwacji. Jest to zarówno siła, jak i słabość tej teorii. Interpretacja kopenhaska nigdy jeszcze nie zawiodła w praktycznych obliczeniach, więc każda nowa idea musi dawać dokładnie te same „odpowiedzi” wszędzie tam, gdzie można przeprowadzić eksperyment; pod tym kątem teoria Everetta pomyślnie przechodzi pierwszą próbę. Wszakże korzyści, jakie daje, polegają jedynie na wyeliminowaniu pozornie paradoksalnych aspektów z doświadczenia z dwiema szczelinami albo z doświadczeń podobnych do tego, które wymyślili Einstein, Podolsky i Rosen. Z perspektywy kucharzy kwantowych nie widać różnicy między tymi dwiema interpretacjami, nie ma więc potrzeby porzucać starej i znanej teorii dla nowej. Jednak dla kogoś, kto przestudiował eksperymenty myślowe EPR, a także rozmaite testy nierówności Bella, interpretacja Everetta jest bardziej atrakcyjna. W interpretacji Everetta, dokonując wyboru składowej spinu cząstki, którą obserwujemy, nie zmuszamy składowej spinu innej cząstki, położonej daleko stąd w innej części wszechświata, do przyjęcia uzupełniającego stanu, lecz wybieramy gałąź rzeczywistości, w której żyjemy. W tej gałęzi superprzestrzeni spin tej drugiej cząstki jest zawsze dopełnieniem tego, który mierzymy. O tym, który z kwantowych światów mierzymy w naszych doświadczeniach (a zatem także i o tym, który z nich zamieszkujemy) decyduje wybór, a nie przypadek. Gdy wszystkie możliwe rezultaty eksperymentu faktycznie się zdarzają i każdy rezultat jest obserwowany przez jego własny zbiór obserwatorów, nie ma się co dziwić, że to, co sami obserwujemy, jest jednym z możliwych rezultatów eksperymentu.

Drugie spojrzenie

Interpretacja wielu światów mechaniki kwantowej była niemal celowo ignorowana przez środowisko fizyków aż do późnych lat sześćdziesiątych, gdy DeWitt podjął ją na nowo, pisząc o niej sam, a także zachęcając swego studenta, Neilla Grahama, aby kontynuował pracę Everetta i sformułował jej rozwinięcie w ramach pracy doktorskiej. Jak wyjaśnił DeWitt w artykule w „Physics Today” w 1970 roku¹⁰¹, urok interpretacji Everetta ujawnia się natychmiast, gdy zastosuje się ją do paradoksu kota Schrödingera. Nie musimy się już więcej zastanawiać nad zagadką, jak kot to robi, że jest równocześnie żywy i martwy, lub ani żywy, ani martwy. Zamiast tego wiemy, że w naszym świecie pudło zawiera kota, który jest żywy albo jest martwy, a w sąsiednim świecie istnieje inny obserwator z identycznym pudłem zawierającym kota, który jest martwy albo jest żywy. Jeśli jednak wszechświat „wciąż rozszczepia się na ogromną liczbę gałęzi”, to „każde przejście kwantowe zachodzące w każdej gwiazdzie, w każdej galaktyce, w każdym zakątku wszechświata, rozszczepia nasz lokalny świat na miriady własnych kopii”.

DeWitt wspomina szok, jaki przeżył przy pierwszym zderzeniu z tą „ideą 10¹⁰⁰ trochę niedoskonałych kopii samego siebie wciąż rozszczepiających się na dalsze kopie”. Został jednak

¹⁰¹ T. 23, nr 9 (wrzesień 1970), s. 30.

przekonany, zarówno przez własne prace z tej dziedziny, jak i przez pracę doktorską Everetta, a także przez badania Grahama. Rozważał nawet, do jakiego stopnia rozszczepianie rzeczywistości może zachodzić. W skończonym wszechświecie - a istnieją solidne podstawy do przekonania, że jeżeli ogólna teoria względności dobrze opisuje rzeczywistość, w której żyjemy, to wszechświat musi być skończony¹⁰² - może jedynie istnieć skończona liczba „gałęzi” na kwantowym drzewie, a w superprzestrzeni może po prostu zabraknąć miejsca, aby pomieścić bardziej osobliwe możliwości, subtelną strukturę tego, co DeWitt nazywa zabłąkanymi światami [maverick worlds], rzeczywistości z dziwnie zniekształconymi wzorcami zachowań. W każdym razie, chociaż ścisła interpretacja Everetta mówi, że wszystko, co jest możliwe, musi się zdarzyć w którejś z wersji rzeczywistości gdzieś w superprzestrzeni, nie oznacza to, że musi się zdarzyć wszystko, co jest wyobrażalne. Możemy sobie wyobrażać rzeczy niemożliwe, których rzeczywiste światy nie mogą zawierać. W świecie, który jest identyczny z naszym, nawet gdyby świny (poza tym identyczne z naszymi) miały skrzydła, nie mogłyby latać; bohaterowie, nawet najbardziej wyjątkowi, nie mogą przekradać się w poprzek przez wyłomy w czasie, aby odwiedzać alternatywne rzeczywistości, aczkolwiek autorzy powieści fantastycznonaukowych spekulują na temat konsekwencji tego rodzaju działań; i tak dalej.

Konkluzja DeWitta jest równie dramatyczna jak wcześniejsza konkluzja Wheelera:

Punkt widzenia, z którego patrzą Everett, Wheeler i Graham, rzeczywiście robi wrażenie. Jest on jednak całkowicie przyczynowy i mógłby zostać zaakceptowany nawet przez Einsteina [...] bardziej niż większość innych interpretacji zasługuje na miano naturalnego sukcesora programu interpretacji zapoczątkowanego w 1925 roku przez Heisenberga.

W tym miejscu wypada zaznaczyć, że sam Wheeler wyraził ostatnio wątpliwości wobec tego przedsięwzięcia. W odpowiedzi na pytanie zadane mu na sympozjum zorganizowanym dla upamiętnienia setnej rocznicy urodzin Einsteina, Wheeler powiedział o teorii wielu światów: „Przyznaję, że z bólem serca musiałem w końcu wycofać swoje poparcie dla tego poglądu - chociaż na początku byłem jego zdecydowanym zwolennikiem - ponieważ obawiam się, że niesie on ze sobą nadmierny bagaż metafizyczny”¹⁰³.

Niekoniecznie oznacza to fiasko interpretacji Everetta - fakt, że Einstein zmienił zdanie na temat statystycznych podstaw mechaniki kwantowej, bynajmniej jednak tych podstaw nie uśmiercił. Nie oznacza to także, iż to, co powiedział Wheeler w 1957 roku, nie jest już słuszne. W roku 1983 wciąż jest prawdą, że z wyjątkiem teorii Everetta nie dysponujemy spójnym systemem pojęć, które

¹⁰² Ogólna teoria względności jest formalnie teorią opisującą układy zamknięte, a Einstein początkowo wyobrażał sobie wszechświat jako zamknięty i skończony układ Mimo że wiele się mówi o otwartych i nieskończonych wszechświatach, ściśle biorąc ogólna teoria względności nie obejmuje takich opisów w poprawny sposób. Nasz wszechświat mógłby być zamknięty, gdyby zawierał wystarczającą ilość materii, aby grawitacja zakrzywiła czasoprzestrzeń wokół siebie, tak jak to się dzieje wokół czarnej dziury. Wymagałoby to znacznie więcej materii, niż widzimy w galaktykach wokół nas, ale obserwacje dynamiki wszechświata sugerują, że istotnie znajduje się on w stanie bardzo bliskim zamkniętego - albo „zamknięty na styk”, albo „lekko nie domknięty”. Jeżeli tak rzeczywiście jest, to nie ma obserwacyjnych dowodów, które uzasadniałyby odrzucenie podstawowych konsekwencji teorii względności, zgodnie z którymi wszechświat jest zamknięty i skończony, a równocześnie wszystko wskazuje na to, że istnieje rodzaj ciemnej materii, która grawitacyjnie utrzymuje wszechświat w tym stanie. Pewne podstawy tych idei można znaleźć w rozdziale napisanym przez Wheelera do *Sonie Strangeness in the Proportion*.

¹⁰³ H. Woolf (red.), *Sonie Strangeness in the Proportion*, s. 385-386.

wyjaśniałyby, jak należy rozumieć kwantowanie wszechświata. Zmiana poglądów Wheelera świadczy jednak o tym, jak trudna do zaakceptowania jest teoria wielu światów. Ja osobiście odbieram fakt pokaźnego bagażu metafizycznego jako rzecz daleko mniej niepokojącą niż kopenhaska interpretacja eksperymentu z kotem Schrödingera lub konieczność istnienia trzykrotnie większej liczby wymiarów „przestrzeni fazowej” niż liczba cząstek we wszechświecie. Koncepcje te nie stają się mniej dziwne tylko dlatego, że są szeroko dyskutowane, a interpretacja wielu światów daje nowe odpowiedzi na pytanie, dlaczego zamieszkaną przez nas wszechświat jest taki, jaki jest. Teoria ta jest wciąż żywa i zasługuje na poważne potraktowanie.

Poza Everettem

Dzisiejsi kosmologowie opowiadają o wydarzeniach, które miały miejsce tuż po narodzinach wszechświata w wielkim wybuchu i obliczają reakcje, które odbywały się w chwili, gdy wiek wszechświata wynosił 10^{-35} sekundy lub jeszcze mniej. Reakcje te dotyczą całego roju cząstek, promieniowania, produkcji par i anihilacji. Założenia co do warunków, w jakich te reakcje zachodzą, biorą się z połączenia teorii z obserwacją oddziaływania cząstek w gigantycznych akceleratorach, podobnych do tego, który funkcjonuje pod Genewą w CERN-ie. Z obliczeń tych wynika, że z naszych niepozornych doświadczeń tutaj na Ziemi można wyprowadzić prawa fizyki, które potrafią wyjaśnić w logiczny i spójny sposób, jak wszechświat doszedł od stanu niemal nieskończonej gęstości do stanu, w którym widzimy go obecnie. Teorie próbują nawet przewidzieć bilans materii i antymaterii, a także materii i promieniowania, we wszechświecie¹⁰⁴. Każdy, kto choć w najmniejszym stopniu interesuje się nauką, słyszał o teorii pochodzenia wszechświata znanej pod nazwą wielkiego wybuchu. Teoretycy radośnie bawią się liczbami opisującymi zdarzenia, które jakoby zaszły w ciągu ułamka sekundy jakieś piętnaście miliardów lat temu. Jednak czy ktokolwiek zastanawia się dziś choć trochę, co te liczby naprawdę znaczą? Umysł ludzki staje bezradny, gdy próbuje zrozumieć konsekwencje tych idei. Kto potrafi pojąć, co naprawdę znaczy liczba w rodzaju 10^{35} sekundy, nie mówiąc już o naturze wszechświata, gdy miał on 10^{-35} sekundy? Naukowcom, którzy stale mają do czynienia z tak niecodziennymi koncepcjami, powinno chyba starczyć wyobraźni, aby pojąć koncepcję równoległych światów.

To proste określenie, zapożyczone z literatury fantastycznonaukowej, jest w gruncie rzeczy zupełnie chybione. Naturalny obraz alternatywnych rzeczywistości wygląda jak gałęzie wyrastające z głównego pnia i biegnące wzdłuż niego w superprzestrzeni jak rozchodzące się linie skomplikowanego węzła kolejowego. Na podobieństwo jakiejś supersuperautostrady z milionami równoległych linii, autorzy powieści fantastycznonaukowych wyobrażają sobie wszystkie światy podążające ramię w ramię przez czas - naszych bliskich sąsiadów niemal identycznych z naszym własnym światem, a różnice stają się tym wyraźniejsze, im bardziej oddalamy się „w poprzek czasu”. Obraz taki sugeruje możliwość zmiany linii na superautostradzie, czyli przemknięcia do sąsiedniego świata. Matematyczna strona problemu niezupełnie przystaje do tego sympatycznego obrazka.

¹⁰⁴ Wszystkie te idee opisane są w mojej książce *Spacewarps*.

Matematycy nie mają żadnych trudności w operowaniu większą liczbą wymiarów niż (tak dla nas oczywiste) trzy. Cały nasz świat, jedna gałąź wielu rzeczywistości Everetta, jest matematycznie opisany w czterech wymiarach, trzech przestrzennych i jednym czasowym, i wszystkie są wzajemnie prostopadłe. Matematyka wykorzystująca większą liczbę wymiarów (z których wszystkie są pod kątem prostym do każdego z pozostałych, łącznie z naszymi czterema) sprowadza się do prostej żonglerki liczbami. Tam właśnie znajdują się alternatywne rzeczywistości, nie równoległe, ale pod kątem prostym do naszej (i do wszystkich pozostałych) - prostopadłe światy rozgałęziające się poprzecznie w superprzestrzeni. Dosyć trudno to sobie wyobrazić¹⁰⁵, ale za to łatwiej zrozumieć, dlaczego przemykanie w poprzek do alternatywnych rzeczywistości jest niemożliwe. Wyruszając w podróż pod kątem prostym do naszego świata, kreujemy swój własny świat. I tak się właśnie dzieje w teorii wielu światów za każdym razem, gdy wszechświat jest postawiony przed kwantowym wyborem. Jedynym sposobem na przedostanie się do jednego z alternatywnych światów, powstających przy tego rodzaju rozszczepianiu wszechświata w wyniku eksperymentu z kotem w pudle albo z dwiema szczelinami, byłoby przemieszczenie się wstecz w czasie w naszej własnej czterowymiarowej rzeczywistości do momentu, gdy eksperyment został wykonany, i następnie pójście - w przód w czasie - wzdłuż innej gałęzi, prostopadłej do naszego świata.

To może okazać się niemożliwe. Konwencjonalna logika każe sądzić, że prawdziwa podróż w czasie musi być niemożliwa, ze względu na związane z nią paradoksy, na przykład taki, który powstaje, gdy idąc wstecz w czasie, zabijamy własnego dziadka przed poczęciem naszego ojca. Z drugiej strony, na poziomie kwantowym cząstki wydają się cały „czas” podejmować podróże w czasie, a Frank Tipler pokazał, że równania ogólnej teorii względności także dopuszczają podróż w czasie. Można wyobrazić sobie autentyczną podróż w czasie, która nie powoduje paradoksów. W takiej formie zależałaby od realności alternatywnych wszechświatów. David Gerrold przedstawił tę możliwość w interesującej książce fantastycznonaukowej *The Man Who Folded Himself*, wartej przeczytania jako wprowadzenie do złożonych i subtelnych właściwości wielowymiarowego wszechświata. Główna idea polega na tym, że jeśli przeniesiemy się wstecz w czasie i zabijemy własnego dziadka, to wejdziemy do alternatywnego świata (lub stworzymy go, zależnie od punktu widzenia), który odgałęzia się pod kątem prostym do tego, od którego zaczęliśmy podróż. W tej „nowej” rzeczywistości nasz ojciec i my sami nigdy się nie urodziliśmy, ale paradoksu nie ma, bo jesteśmy nadal urodzeni w „początkowej” rzeczywistości i podróżujemy wstecz w czasie do

¹⁰⁵ Jeśli trudno nam w to uwierzyć, to być może zaczynamy odbierać stare dobre równanie Schrödingera jako bardziej swojskie i znajome. Nic z tych rzeczy. Falowa interpretacja mechaniki kwantowej rzeczywiście wywodzi się od prostego równania znanego z innych dziedzin fizyki, a poprawny kwantowo-mechaniczny opis dla pojedynczej cząstki rzeczywiście sprowadza się do fali w trzech wymiarach, aczkolwiek nie w naszej zwykłej przestrzeni, lecz w tak zwanej przestrzeni konfiguracyjnej. Niestety, potrzebne są trzy różne wymiary dla fali reprezentującej każdą cząstkę, którą opisuje dane równanie. Aby przedstawić dwie oddziałujące cząstki, potrzebujemy sześciu wymiarów; do opisu układu trzech cząstek potrzeba dziewięciu wymiarów i tak dalej. Funkcja falowa całego wszechświata, cokolwiek to znaczy, jest funkcją w przestrzeni o trzykrotnie większej liczbie wymiarów niż liczba wszystkich cząstek we wszechświecie. Fizycy, którzy odrzucają interpretację rzeczywistości Everetta jako niosącą zbyt duży „bagaż”, łatwo zapominają, że równania falowe, których używają na co dzień, mogą zostać uznane za dobry opis wszechświata, tylko jeśli się zaakceptuje bagaż, delikatnie mówiąc, także całkiem pokazy.

alternatywnej gałęzi. Wróćmy jeszcze raz, aby odkręcić sprawę z morderstwem, a ponownie wejdziemy do początkowej gałęzi rzeczywistości albo przynajmniej do podobnej.

Jednak Gerrold nie „wyjaśnia” dziwnych wydarzeń, które przytrafiają się głównemu bohaterowi w kategoriach prostopadłych rzeczywistości. O ile mi wiadomo, niniejsze fizyczne wyjaśnienie matematycznej struktury interpretacji Everetta jest pierwsze w swoim rodzaju - z całą pewnością jest to nowy motyw w dziedzinie podróży czasowych, dotąd nie wykorzystywany przez autorów powieści fantastycznonaukowych, którym niniejszym oferuję tę możliwość¹⁰⁶. Warto raz jeszcze podkreślić fakt, że w tej interpretacji alternatywne rzeczywistości nie leżą „wzdłuż” naszej (co ułatwiałoby przekradanie się tam i z powrotem), lecz prostopadle zarówno do naszej, jak i do wszystkich innych. Być może jest świat, w którym Bonaparte miał na imię Piotr, a nie Napoleon, ale historia potoczyła się tam w zasadzie tak samo jak w naszej gałęzi rzeczywistości; może jest również świat, w którym Bonaparte nigdy nie istniał. Oba te światy są równie odległe od naszego i niedostępne dla nas, do żadnego nie da się dotrzeć inaczej, niż podróżując wstecz w czasie w naszej gałęzi do odpowiedniego punktu rozgałęzienia, a następnie skręcając pod kątem prostym (jednym z wielu kątów prostych!) i ponownie wędrując w przód w czasie. Koncepcję tę można rozszerzyć, aby usunąć wszelkie paradoksy związane z podróżami w czasie, tak ulubione przez autorów i czytelników literatury fantastycznonaukowej i omawiane przez filozofów. Wszystkie możliwe zdarzenia muszą się wydarzyć, w takiej czy innej gałęzi rzeczywistości. Kluczem do osiągnięcia tych możliwych światów nie jest podróż w poprzek w czasie, lecz wstecz, a następnie w przód w innej gałęzi. Prawdopodobnie najlepsza powieść fantastycznonaukowa wszechczasów wykorzystuje właśnie interpretację wielu światów, aczkolwiek nie jestem pewien, czy jej autor, Gregory Benford, uczynił to świadomie. W jego książce *Timescape* los świata zostaje zasadniczo zmieniony w wyniku informacji, które zostają wysłane w latach pięćdziesiątych naszego wieku wstecz w czasie i odebrane w latach sześćdziesiątych. Tę kunsztownie skonstruowaną i trzymającą w napięciu opowieść dobrze by się czytało nawet bez wątku fantastycznonaukowego. Jeden aspekt, który chciałbym w tym miejscu wykorzystać, to fakt, że ponieważ świat ulega zmianie w wyniku działań ludzi, którzy odebrali sygnały z przyszłości, to przyszłość, z której te wiadomości nadeszły, dla nich nie istnieje. Skąd więc nadeszły te informacje? W tym miejscu moglibyśmy zbudować argumentację opartą na starej interpretacji kopenhaskiej i odwołującą się do widmowych światów wysyłających wstecz w czasie widmowe sygnały, które wpływałyby na sposób, w jaki zapada się funkcja falowa, ale przeprowadzenie przekonującego dowodu nie byłoby łatwym zadaniem. Z drugiej strony, w interpretacji wielu światów nietrudno wyobrazić sobie informacje przekazywane wstecz w czasie w jednej gałęzi do punktu rozgałęzienia, gdzie są one odbierane przez ludzi, którzy następnie ruszają w przód w czasie w swojej własnej (innej) gałęzi. Oba alternatywne światy istnieją, a połączenie między nimi zostaje zerwane w momencie podjęcia krytycznego działania decydującego o przyszłości¹⁰⁷. *Timescape*, oprócz tego, że jest świetnym

¹⁰⁶ Kiedy ta książka była przygotowywana do druku, napisałem opowiadanie pod tytułem *Perpendicular Worlds* [Prostopadłe światy], w którym wykorzystałem tę ideę.

¹⁰⁷ W tym miejscu warto podkreślić jeszcze jeden aspekt podróży w czasie. Nawet jeżeli okażą się one teoretycznie możliwe, to mogą pojawić się nieprzewidywalne trudności praktyczne przy wysyłaniu w podróż obiektów materialnych.

czytałem, zawiera także „eksperyment myślowy” równie intrygujący i równie trafny w kontekście mechaniki kwantowej jak paradoks EPR i doświadczenie z kotem Schrödingera. Sam Everett być może tego nie doceniał, ale rzeczywistość wielu światów jest dokładnie taka, jakiej potrzeba do podróży w czasie. Jest również taka, jakiej potrzeba, aby wyjaśnić, dlaczego my znajdujemy się w tym miejscu i debatujemy nad tą sprawą.

Nasze specjalne miejsce

Zgodnie z moją interpretacją teorii wielu światów przyszłość nie jest zdeterminowana, przynajmniej w granicach naszej świadomej percepcji świata, zdeterminowana jest natomiast przeszłość. Poprzez akt obserwacji wybieramy „prawdziwą” historię spośród wielu możliwych, a gdy ktoś choć raz zobaczył w naszej rzeczywistości drzewo, pozostaje ono tam nawet wtedy, gdy nikt na niego nie patrzy. W tym sensie istnieje ścieżka wstecz aż do wielkiego wybuchu. W każdym węzle kwantowej autostrady może powstawać wiele nowych rzeczywistości, ale ścieżka, która prowadzi do nas, jest wyraźna i jednoznaczna.

Istnieje jednak wiele „dróg” w przyszłość i jakaś wersja „nas” podąży każdą z nich. Każda wersja będzie uważać, że podąża unikatową ścieżką i będzie miała za sobą unikatową przeszłość, ale nie sposób przewidzieć przyszłości, ponieważ możliwości są bardzo liczne. Być może będziemy mogli odebrać wiadomości z przyszłości, wysłane metodami mechanicznymi, jak w *Timescape*, albo, jeśli ktoś lubi sobie pofantazjować, poprzez sny i postrzeganie pozazmysłowe. Wszakże szansa na to, iż będzie z tych sygnałów jakiś pożytek, jest niewielka. Ze względu na rozmaitość przyszłych światów, każdy sygnał musi siłą rzeczy być niejednoznaczny i mylący. Jeśli nań zareagujemy, to zachodzi bardzo duże prawdopodobieństwo, że skierujemy własną ścieżkę życia w gałąź rzeczywistości inną niż ta, z której „sygnały” nadeszły, w związku z czym jest bardzo mało prawdopodobne, że one kiedykolwiek „staną się prawdziwe”. Ludzie, którzy sądzą, że teoria kwantowa oferuje klucz do praktycznej realizacji pozazmysłowej percepcji, telepatii i całej reszty tego rodzaju zjawisk, robią sobie niepotrzebne nadzieje.

Obraz wszechświata, w którym „teraźniejszość” porusza się wzdłuż rozwijającego się diagramu Feynmana, jest nadmiernym uproszczeniem. Lepszym obrazem byłby obejmujący wszystkie możliwe światy wielowymiarowy diagram Feynmana, na którym „teraźniejszość” byłaby rozpięta w poprzek wszystkich gałęzi i przemieszczała się w górę wzdłuż każdej z nich. Najważniejsze pytanie, które w ramach tej teorii wciąż pozostaje bez odpowiedzi, to dlaczego nasza percepcja rzeczywistości jest akurat taka, jaka jest - dlaczego wybór ścieżek przez kwantowy labirynt, który miał swój początek w wielkim wybuchu i przywiódł nas tutaj, miał ten szczególny charakter, że doprowadził do pojawienia się we wszechświecie istot inteligentnych?

Odpowiedź zawiera się w koncepcji znanej jako zasada antropiczna, która mówi, że warunki istniejące w naszym wszechświecie są jedynymi dopuszczalnymi warunkami (z niewielkimi odchyleniami), które pozwalają rozwinąć się podobnym do nas formom ożywionym, jest więc

Wysyłanie wiadomości powinno być jednak względnie proste, jeśli tylko znajdziemy sposób na użycie do tego cząstek, które poruszają się wstecz w czasie w interpretacji Feynmana.

nieuniknione, że jakiegokolwiek pokrewne nam inteligentne istoty muszą widzieć dookoła siebie wszechświat podobny do tego, jaki my widzimy¹⁰⁸. Gdyby wszechświat nie był taki, jaki jest, to i nas nie byłoby tutaj, aby go obserwować. Możemy sobie wyobrazić jakiś inny świat (podążający od wielkiego wybuchu innymi kwantowymi ścieżkami), który dokonał nieco innych kwantowych wyborów w początkowej fazie ekspansji, w wyniku czego nie powstały gwiazdy i planety i nie istnieje życie w formach znanych z naszego świata. Albo weźmy inny przykład - wydaje się, że w naszym wszechświecie istnieje znaczna przewaga cząstek materii nad antymaterią, której jest albo bardzo mało, albo wcale jej nie ma. Być może nie istnieje żaden fundamentalny powód tej asymetrii i jest to po prostu przypadkowy rezultat reakcji, które zachodziły w ognistej fazie ewolucji wielkiego wybuchu. Z równym prawdopodobieństwem wszechświat mógłby być pusty lub składać się głównie z cząstek, które nazywamy antymaterią i być prawie lub zupełnie pozbawiony cząstek materii. W pustym wszechświecie nie byłoby oczywiście znanych nam form życia; we wszechświecie zbudowanym z antymaterii mogłoby istnieć życie dokładnie takie jak nasze, coś w rodzaju lustrzanego odbicia naszego świata. Pozostaje zagadką, dlaczego w wyniku wielkiego wybuchu pojawił się akurat świat idealny dla powstania życia.

Zasada antropiczna mówi, że może istnieć wiele możliwych światów i że my sami jesteśmy nieuniknionym produktem naszego typu wszechświata. Gdzie są jednak te inne światy? Czy są to widma, jak oddziałujące światy interpretacji kopenhaskiej? Czy może odpowiadają one różnym cyklom życia całego wszechświata, przed wielkim wybuchem, w którym zaczęły się czas i przestrzeń w znanej nam postaci? Lub może są to światy Everetta istniejące prostopadle do naszego własnego świata? Wydaje mi się, że jest to zdecydowanie najlepsze z dostępnych dzisiaj wytłumaczeń, oraz że rozwiązanie fundamentalnej zagadki - dlaczego widzimy taki, a nie inny świat - kompensuje z nadwyżką ciężar bagażu, który niesie ze sobą interpretacja Everetta. Większość alternatywnych rzeczywistości kwantowych jest nieodpowiednia dla podtrzymania życia i dlatego nie posiada form ożywionych. Warunki konieczne dla podtrzymania życia są dosyć szczególne, więc gdy istoty żywe spoglądają wstecz wzdłuż kwantowej ścieżki swego wszechświata, na której powstały, widzą szczególne zdarzenia, rozgałęzienia kwantowej drogi, które niekoniecznie są najbardziej prawdopodobne ze statystycznego punktu widzenia, ale to właśnie one prowadzą do powstania inteligentnego życia. Wielość światów podobnych do naszego, lecz o innej historii - w których Anglia wciąż panuje we wszystkich swoich północnoamerykańskich koloniach, w których ludy Ameryki Północnej skolonizowały Europę itp. - wspólnie tworzą jeden mały wycinek znacznie rozleglejszej rzeczywistości. Specjalne warunki konieczne dla powstania życia nie są efektem przypadku, lecz wyboru. Wszystkie światy są jednakowo realne, lecz jedynie światy odpowiednie dla powstania życia mają obserwatorów.

Sukces eksperymentów zespołu Aspecta weryfikujących nierówność Bella wyeliminował wszystkie dotychczas sformułowane interpretacje mechaniki kwantowej i pozostawił jedynie dwie

¹⁰⁸ Zasada antropiczna jest pokrótce przedstawiona w mojej książce *Spacewarps*; więcej szczegółów można znaleźć w *The Accidental Universe* Paula Daviesa. W swojej *Genesis* wyjaśniam szczegółowo koncepcję powstania wszechświata w wielkim wybuchu.

możliwości. Musimy zaakceptować albo interpretację kopenhaską wraz z jej widmowymi rzeczywistościami i w połowie martwymi kotami, albo wersję Everetta z wieloma światami. Oczywiście, być może żadna z tych dwóch najlepszych ofert z kwantowego supermarketu nie jest poprawna. Nie można wykluczyć, że istnieje jeszcze inna interpretacja kwantowo-mechanicznej rzeczywistości, pozwalająca rozwiązać wszystkie zagadki rozwiązane dotąd przez interpretację kopenhaską i Everetta, łącznie z testem Bella, a jednocześnie wykraczająca poza naszą obecną wiedzę - być może na podobnej zasadzie, jak ogólna teoria względności zawiera w sobie, uzupełnia i wykracza poza szczególną teorię względności. Wszakże jeśli nam się wydaje, że jest to proste i łatwe wyjście z sytuacji, to powinniśmy pamiętać, że każda „nowa” interpretacja musi wyjaśnić wszystko, czego nauczyliśmy się od momentu, gdy Planck postawił swój wielki krok w nieznaną, i że musi wyjaśnić to wszystko co najmniej równie dobrze jak dwie najpopularniejsze dziś interpretacje. Są to bardzo wysokie wymagania, a nauka nie ma w zwyczaju siedzieć i czekać, aż ktoś poda „lepszą” odpowiedź na jej problemy. Ponieważ lepszej odpowiedzi nie mamy, musimy zadowolić się konsekwencjami najlepszej odpowiedzi, jaką mamy. Pisząc te słowa w latach osiemdziesiątych, po ponad półwieczu intensywnego wysiłku na rzecz rozwiązania zagadki kwantowej rzeczywistości przez najtęższe umysły dwudziestego stulecia, musimy przyjąć do wiadomości fakt, że w chwili obecnej nauka może dać jedynie te dwa alternatywne wyjaśnienia konstrukcji wszechświata. Na pierwszy rzut oka żadne z nich nie wydaje się zbyt zjadliwe. Mówiąc prostym językiem, albo nic nie jest rzeczywiste, albo wszystko jest rzeczywiste.

Kwestia ta być może nie zostanie nigdy rozstrzygnięta, ponieważ skonstruowanie eksperymentu, który wskaże poprawniejszą z tych teorii, może się okazać niemożliwe (jeżeli pominiemy podróże w czasie). Znamienne, że Max Jammer, jeden z najbardziej utalentowanych filozofów kwantowych, bynajmniej nie przesadził, stwierdzając, że „teoria wieloświatowa jest niewątpliwie jedną z najbardziej śmiałych i ambitnych teorii w historii nauki”¹⁰⁹. Wyjaśnia ona -jak najdosłowniej - wszystko, łącznie z życiem i śmiercią kotów. Jako niepoprawnemu optymiście teoria ta najbardziej przypadła mi do gustu. Wszystko jest możliwe, a poprzez nasze decyzje i czyny wybieramy naszą własną ścieżkę przez wiele kwantowych światów. W świecie, w którym żyjemy, dostajemy to, co widzimy; nie ma ukrytych zmiennych; Bóg nie gra w kości; wszystko jest rzeczywiste. Zgodnie z często przytaczaną anegdotą Niels Bohr, gdy ktoś przedstawił mu ekstrawagancki pomysł mający posłużyć do rozwiązania jednej z zagadek teorii kwantowej w latach dwudziestych, powiedział: „Pańska teoria jest szalona, ale nie jest dostatecznie szalona, aby mogła być prawdziwa”¹¹⁰. Moim zdaniem teoria Everetta jest dostatecznie szalona, aby mogła być prawdziwa. Uwaga ta wydaje się nader stosowna jako zakończenie naszych poszukiwań kota Schrödingera.

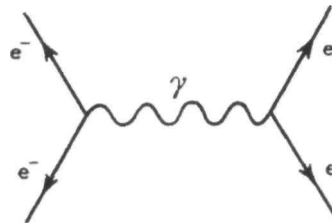
¹⁰⁹ M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, s. 517.

¹¹⁰ Cytowane m.in. przez Roberta Wilsona w *The Universe Next Door*, s. 156.

Epilog

Nie dokończone sprawy

Historia kwantów, którą przedstawiłem, wydaje się przejrzysta i uporządkowana, jeśli pominiemy semifilozoficzną kwestię wyboru pomiędzy interpretacją kopenhaską a wersją wielu światów. Jest to najlepsza metoda przedstawienia dziejów nowoczesnej fizyki w formie książkowej, ale nie zawiera ona całej prawdy. Historia kwantów nie dobiegła końca, a teoretycy zmagają się dzisiaj z problemami, które mogą doprowadzić do równie fundamentalnych odkryć, jak to, którego dokonał Bohr, gdy skwantował atom. Pisanie o tych nie dokończonych sprawach jest ryzykowne i mało satysfakcjonujące; przyjęte poglądy na to, co istotne, a co może zostać bez szkody pominięte, mogą ulec zmianie, zanim ten tekst trafi do drukarni. Jednak, aby trochę przygotować Czytelnika na prawdopodobny dalszy rozwój wydarzeń, zamieściłem w epilogu zestawienie nie dokończonych aspektów kwantowej opowieści oraz pewne sugestie, czego należy oczekiwać w przyszłości. Nie omówionym przeze mnie atutem teorii kwantowej jest ta jej gałąź, która powszechnie uchodzi za klejnot w koronie i jej największy triumf. Mam na myśli elektrodynamikę kwantową, w skrócie QED [Quantum ElectroDynamics], teorię, która „wyjaśnia” oddziaływanie elektromagnetyczne w kategoriach kwantowych. QED rozkwitła w latach czterdziestych i okazała się tak skuteczna, że stała się modelem dla teorii silnych oddziaływań jądrowych, którą z kolei nazwano chromodynamiką kwantową, w skrócie QCD [Quantum ChromoDynamics].



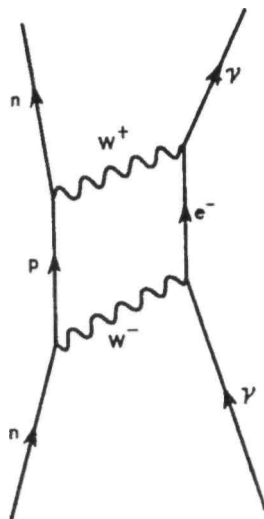
Ryc. E.1. Klasyczny diagram Feynmana przedstawiający oddziaływanie cząstek

Słowo „chromo” znalazło się w nazwie dlatego, że teoria ta opisuje oddziaływanie cząstek zwanych kwarkami, których pewne własności teoretycy - z właściwą sobie fantazją - rozróżniają, nadając im określenia pochodzące od kolorów. Jednak QED ma jedną dużą wadę - swą poprawność zawdzięcza temu, że w obliczeniach za jej pomocą trochę się naciąga pewne operacje matematyczne, aby uzyskać zgodność z danymi doświadczalnymi.

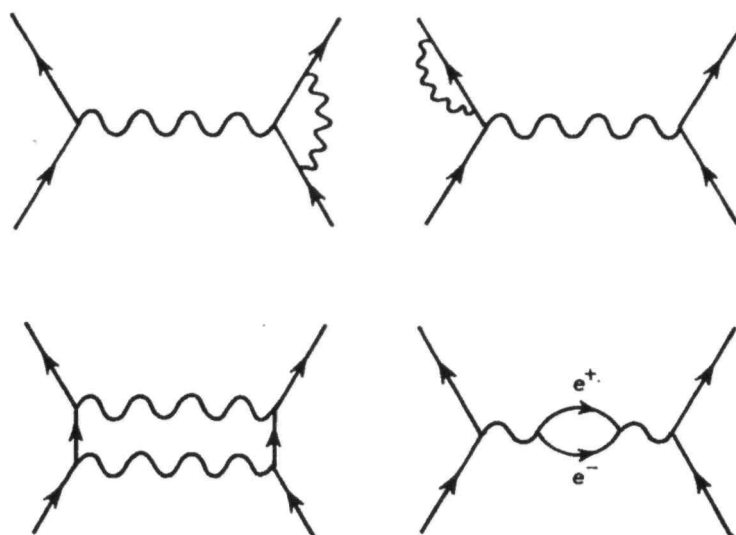
Problem ten wiąże się z faktem, że elektron w teorii kwantowej nie jest odosobnioną cząstką (wyodrębnionym klasycznym ciałem), lecz otacza go chmura wirtualnych cząstek. Ta chmura cząstek musi mieć jakiś wpływ na masę elektronu. Kiedy formułuje się równania kwantowe dla układu elektron + chmura, to matematyczne rozwiązanie tych równań daje nieskończenie duże „odpowiedzi”. Począwszy od równania Schrödingera, kamienia węgielnego kwantowej kuchni, poprawna matematyczna procedura dla elektronu daje nieskończoną masę, nieskończoną energię i nieskończony ładunek elektryczny. Nie istnieje formalnie poprawny sposób na usunięcie tych

nieskończoności, lecz można to zrobić, oszukując. Znamy masę elektronu z bezpośrednich pomiarów eksperymentalnych i wiemy, że jest to wynik, który powinniśmy uzyskać z naszej teorii dla masy układu elektron + chmura. Teoretycy usuwają więc nieskończoności z równań, w efekcie dzieląc jedną nieskończoność przez inną. W matematyce, jeśli się podzieli nieskończoność przez nieskończoność, otrzyma się dowolny wynik, więc fizycy mówią, że wynik musi być taki, jakiego potrzebujemy, czyli równy zmierzonej masie elektronu. Procedura ta nosi nazwę renormalizacji.

Aby lepiej pojąć, co tu się dzieje, wyobraźmy sobie, że ktoś ważący 150 funtów udaje się na Księżyc, gdzie siła grawitacji wynosi jedynie 1/6 ziemskiej grawitacji. Na zwykłej łazienkowej wadze zabranej w podróż z Ziemi waga naszego podróżnika wyniesie zaledwie 25 funtów, mimo że masa jego ciała nie uległa zmianie. W tej sytuacji byłoby rozsądne „zrenormalizowanie” łazienkowej wagi: takie ustawienie pokrętła zerującego, aby wskazówka doszła do 150 funtów. Chwył ten zadziała wszakże tylko dlatego, że znamy rzeczywisty ziemski ciężar podróżnika. Gdyby waga pokazała nieskończenie duży ciężar, moglibyśmy dostosować jej wskazania do rzeczywistości, dokonując nieskończenie dużej korekty pokrętłem. To właśnie robią kwantowi teoretycy w QED. Wprawdzie 150 podzielone przez 6 daje jednoznacznie wynik 25, ale 25 razy nieskończoność podzielone przez nieskończoność nie daje 25 ani żadnego jednoznacznego wyniku, lecz może dać cokolwiek. Mimo to chwył jest niezwykle skuteczny. Po usunięciu nieskończoności rozwiązania równania Schrödingera spełniają wszelkie oczekiwania fizyków i precyzyjnie opisują wpływ nawet najbardziej subtelnych efektów oddziaływania elektromagnetycznego na widma atomowe. Wyniki są idealnie dokładne, toteż większość teoretyków akceptuje QED jako poprawną teorię i nie przejmują się nieskończonościami, podobnie jak kwantowi kucharze nie przejmują się interpretacją kopenhaską czy zasadą nieoznaczoności.



Ryc. E.2. Kwantowe poprawki do praw elektrodynamiki powstają w wyniku obecności wirtualnych cząstek. Na diagramach reprezentują je zamknięte pętle, które są źródłem nieskończoności w wyrażeniach na energię i mogą być usunięte tylko przez zastosowanie formalnie niedozwolonego chwyłu z renormalizacją



Ryc. E.3. Wymiana dwóch bozonów W pomiędzy neutrinem a neutronem wystarcza do powstania nieskończonej poprawki w obliczeniach (uwzględnienie tylko jednego bozonu nie wystarcza)

Jednak to, że podstęp działa, nie oznacza, że przestaje być podstępem. Osoba, której zdanie na temat teorii kwantowej zasługuje na najwyższy szacunek, wcale nie jest zachwycona obecnym stanem rzeczy. W wykładzie wygłoszonym stosunkowo niedawno¹¹¹, bo w 1975 roku, w Nowej Zelandii¹¹², Paul Dirac następująco skomentował swój pogląd na QED:

Muszę przyznać, że jestem głęboko niezadowolony z obecnej sytuacji, ponieważ ta tak zwana „dobra teoria” w istocie opiera się na arbitralnym pomijaniu nieskończoności pojawiających się w jej równaniach. To nie jest rozsądna matematyka. Rozsądna matematyka może sobie pozwolić na pominięcie jakiejś wielkości dlatego, że jest mała - a nie dlatego, że jest nieskończenie duża, a my jej nie chcemy!

Dirac zakończył swój wykład uwagą, że jego zdaniem teoria musi ulec drastycznym zmianom, jeżeli ma stać się matematycznie rozsądna. „Proste zmiany nie pomogą... wydaje mi się, że niezbędne zmiany będą równie radykalne, jak przejście od teorii Bohra do mechaniki kwantowej”. Gdzie mamy szukać tej nowej teorii? Gdybym znał odpowiedź na to pytanie, miałbym zapewnioną Nagrodę Nobla; mogę jednak wskazać na pewne interesujące nowe osiągnięcia w fizyce, które być może zadowolą nawet Diraca, jeśli chodzi o cechy wymagane od dobrej teorii fizycznej.

Skręcona czasoprzestrzeń

Być może klucz do lepszego zrozumienia natury wszechświata leży w tej części świata fizycznego, którą teoria kwantowa dotychczas w zasadzie ignorowała. Mechanika kwantowa wiele mówi o cząstkach materialnych, ale prawie nic o pustej przestrzeni. Ponad pięćdziesiąt lat temu, w książce *The Nature of the Physical World* Eddington zwrócił uwagę, że rewolucja, która dała nam obraz ciał fizycznych jako obiektów wypełnionych w dużej mierze próżnią, jest jeszcze bardziej fundamentalna niż rewolucja wywołana w naszych poglądach przez teorię względności. Nawet

¹¹¹ Paul Dirac zmarł w 1984 roku, wkrótce po ukazaniu się pierwszego wydania tej książki (przyp. tłum.).

¹¹² *Directions in Physics*, rozdział drugi. Dirac nie był w swoich poglądach odosobniony. Banesh Hoffmann w *The Strange Story of the Quantum* stwierdza na s. 213, że renormalizacja prowadzi fizykę w ślepy zaułek. „Śmiała zonglerka nieskończonościami jest niezwykle błyskotliwa, lecz jej blask oświetla chyba ślepą uliczkę”.

przedmioty tak solidne, jak moje biurko lub ta książka, są w gruncie rzeczy prawie wyłącznie pustą przestrzenią. Stosunek objętości materii do objętości próżni jest mniejszy niż proporcja między ziarenkiem piasku a katedrą westminsterską. O tych zaniedbanych 99,99999... procentach wszechświata teoria kwantowa mówi, że kipią one od aktywności wirtualnych cząstek. Niestety, te same równania, które dają nieskończone rozwiązania w elektrodynamice kwantowej, wskazują także, że gęstość energii próżni jest nieskończona, wobec czego nawet do pustej przestrzeni musi zostać zastosowana renormalizacja. Kiedy standardowe równania mechaniki kwantowej połączy się z równaniami ogólnej teorii względności, sytuacja staje się jeszcze bardziej beznadziejna - nieskończoności pojawiają się nadal, lecz tym razem nie da się ich nawet zrenormalizować. Widać, że pukamy pod niewłaściwy adres, ale pod jaki adres powinniśmy pukać?

Roger Penrose z uniwersytetu w Oxfordzie, aby osiągnąć jakiś postęp, powrócił do podstawowych aspektów teorii i badał różne sposoby konstruowania geometrycznego opisu próżni i znajdujących się w niej cząstek, uwzględniające zakrzywioną czasoprzestrzeń oraz skręcone obszary czasoprzestrzeni, które my odbieramy jako cząstki materialne. Z oczywistych powodów skonstruowana przez niego teoria nosi nazwę teorii twistorów¹¹³; niestety nie tylko związana z tą teorią matematyka jest niedostępna dla większości śmiertelników, ale również sama teoria jest daleka od ukończenia. Ważna jest jednak idea - za pomocą jednej teorii Penrose próbuje wyjaśnić zarówno drobne cząstki, jak i olbrzymie obszary pustej przestrzeni wewnątrz obiektu fizycznego, na przykład wewnątrz tej książki. Teoria może okazać się fałszywa, ale podejmując powszechnie zaniedbywany problem Penrose zwraca uwagę na jeden z możliwych powodów niepowodzeń standardowej teorii.

Istnieją także inne sposoby wyrażania zniekształceń czasoprzestrzeni na poziomie kwantowym. Łącząc ze sobą stałą grawitacji, stałą Plancka oraz prędkość światła (trzy fundamentalne stałe fizyczne), można otrzymać stałą o wymiarze długości, fundamentalną jednostkę, którą można uznać za kwant długości reprezentujący najmniejszy obszar przestrzeni, który daje się sensownie opisać. Jest ona rzeczywiście bardzo mała, wynosi około 10^{-35} metra i jest nazywana długością Plancka. Żonglując w podobny sposób fundamentalnymi stałymi, można otrzymać jedną i tylko jedną podstawową jednostkę czasu: czas Plancka wynoszący około 10^{-43} sekundy¹¹⁴. Mówienie o odcinkach czasu krótszych niż czas Plancka lub o odległościach mniejszych niż długość Plancka jest pozbawione sensu.

Kwantowe fluktuacje geometrii przestrzeni są całkowicie zaniedbywalne w skali atomów, a nawet cząstek elementarnych, ale na tym najbardziej fundamentalnym poziomie sama przestrzeń może być uważana za coś w rodzaju piany kwantowych fluktuacji. John Wheeler, który jest autorem tego pomysłu, ilustruje różnicę w skali, odwołując się do powierzchni oceanu, która lecącemu na dużej wysokości lotnikowi wydaje się płaska, ale jest zupełnie inna dla załogi szalupy ratunkowej, miotanej podczas sztormu przez wzburzoną, nieustannie zmieniającą się

¹¹³ Od ang.: *twist* - skręcać (przyp. tłum.).

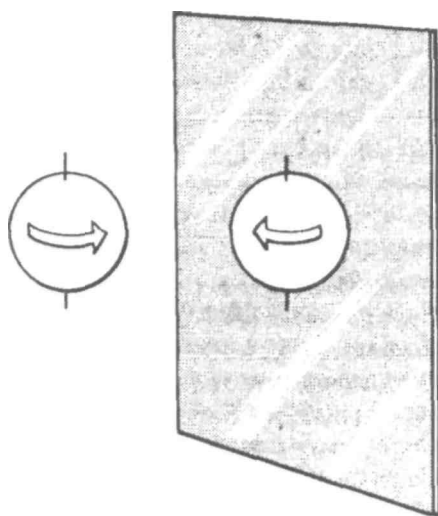
¹¹⁴ Dla zainteresowanych: długość Plancka jest równa pierwiastkowi kwadratowemu z $G\hbar/c^3$, a czas Plancka - pierwiastkowi kwadratowemu z $G\hbar/c^5$.

powierzchnię¹¹⁵. Na poziomie kwantowym czasoprzestrzeń może się okazać bardzo skomplikowana topologicznie, z „kanałami” i „mostami” łączącymi różne obszary; w innej wersji tego pomysłu pusta przestrzeń może być wypełniona gęsto upakowanymi czarnymi dziurami o rozmiarach porównywalnych z długością Plancka.

Dywagacje te są mgliste, niezadowolające i zagadkowe. Jak dotąd nie mamy w tej dziedzinie żadnych fundamentalnych odpowiedzi, ale nie zaszkodzi, jeżeli zdamy sobie sprawę, że nasza wiedza o pustej przestrzeni jest chaotyczna i niepewna, mglista i niepełna. Założenie, że cząstki materialne to tylko skręcone fragmenty pustej przestrzeni, jest niezwykle frapujące. Zważywszy, że jeśli załamią się teorie, które „rozumiemy”, to bardziej prawdopodobnym źródłem dalszego postępu będzie to, czego jeszcze nie rozumiemy, warto mieć oczy i uszy otwarte na to, co wymyślą kwantowi geometryści w ciągu następnych kilku lat. Jednak nowe osiągnięcia nauki, które w 1983 roku trafiły na czołówki pism fachowych, dotyczyły dwóch aspektów porządnego, tradycyjnego podejścia do problemu opartego na fizyce cząstek.

Złamana symetria

Symetria jest w fizyce pojęciem fundamentalnym. Podstawowe równania fizyki są m.in. symetryczne względem odbicia w czasie i działają równie dobrze w przód jak i wstecz w czasie. Inne symetrie można rozpatrywać w kategoriach geometrycznych. Przeanalizujmy lustrzane odbicie wirującej kuli. Jeżeli wiruje ona w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara (patrzac, powiedzmy, z góry), to odbicie w lustrze będzie wirować zgodnie z ruchem wskazówek zegara. Zarówno kula, jak i jej odbicie poruszają się w sposób dozwolony przez prawa fizyki, które są w tym sensie symetryczne (jest oczywiste, że odbicie w lustrze wiruje dokładnie tak jak wirowałaby sama kula, gdyby czas biegł wstecz). Jeżeli czas biegnie wstecz oraz wykonana jest operacja lustrzanego odbicia, to wracamy do punktu wyjścia. Wiele innych rodzajów symetrii istnieje w naturze.



Ryc. E.4. Symetria względem lustrzanego odbicia. Obrót kuli w lustrzanym świecie jest równoważny odwróconemu w czasie obrotowi w rzeczywistym świecie

¹¹⁵ Por. na przykład artykuł Wheelera w: J. Mehra (red.), *The Physicist's Conception of Nature*.

Niektóre z nich można bez problemu opisać i zrozumieć - na przykład elektron i pozytron mogą być uważane za wzajemne lustrzane odbicia; ewentualnie jeden z nich można uznać za odwrócony w czasie odpowiednik drugiego, gdyż odwrócony w czasie dodatni ładunek jest równoważny ładunkowi ujemnemu. Te trzy koncepcje: odbicie w przestrzeni (zwane zmianą parzystości, ponieważ zamienia ono lewą stronę na prawą), odbicie w czasie i odbicie ładunku elektrycznego tworzą jedną z najpotężniejszych podstawowych zasad w fizyce, tak zwane twierdzenie CPT¹¹⁶, które mówi, że prawa fizyki muszą pozostać nie zmienione, jeżeli się równocześnie dokona wszystkich trzech operacji odbicia. Twierdzenie CPT legło u podstaw założenia, że emisja cząstki jest dokładnie równoważna absorpcji jej antycząstkowego odpowiednika.

Inne symetrie trudniej jest pojąć w kategoriach potocznej rzeczywistości, a do pełnego ich zrozumienia konieczny jest opis w języku matematyki. Stanowią one jednak klucz do wyjaśnienia najświeższych nowości z dziedziny fizyki cząstek. Rozważmy prosty przykład: wyobraźmy sobie leżącą na schodach piłkę. Jeżeli przeniesiemy piłkę na inny stopień, to zmienimy jej energię potencjalną w polu grawitacyjnym, w którym się znajduje. Nie ma znaczenia, w jaki sposób poruszymy piłkę - możemy zabrać ją w podróż dookoła świata albo posłać na Marsa i z powrotem, zanim położymy ją na inny stopień. Zmianę energii potencjalnej określa wyłącznie wysokość schodów - początkowego i końcowego. Nie ma także znaczenia, względem którego punktu będziemy mierzyć energię potencjalną. Możemy wykonywać pomiary względem poziomu piwnicy, dając tym samym każdemu schodkowi dużą energię potencjalną, albo względem niższego z dwóch stopni, który w tym wypadku staje się poziomem zerowej energii potencjalnej¹¹⁷. Różnica energii potencjalnej pomiędzy dwoma stanami piłki pozostaje ta sama. Jest to pewien rodzaj symetrii, a ponieważ możemy „przecechować” poziom, względem którego wykonujemy pomiary, nosi ona nazwę symetrii cechowania [gauge symmetry].

Z taką samą sytuacją mamy do czynienia w przypadku sił elektrycznych, skutkiem czego elektromagnetyzm Maxwella jest niezmienniczy względem symetrii cechowania, także QED, jak również QCD, dla której QED jest modelem. Komplikacje pojawiają się przy polach materii na poziomie kwantowym, ale można je wszystkie rozwiązać za pomocą teorii, która charakteryzuje się niezmienniczością względem symetrii cechowania. Jedną z kluczowych własności QED jest wszakże fakt, iż swą niezmienniczość zawdzięcza ona tylko temu, że masa fotonu wynosi zero. Gdyby foton miał jakąkolwiek masę, to renormalizacja teorii QED byłaby niemożliwa i potrafilibyśmy uwolnić się od nieskończoności. Jest to główne źródło problemów, gdy fizycy próbują wykorzystać skuteczną niezmienniczą teorię oddziaływania elektromagnetycznego jako model do konstrukcji podobnej teorii tak zwanych słabych oddziaływań jądrowych, które są odpowiedzialne między innymi za rozpady radioaktywne i emisję cząstek beta (elektronów) z radioaktywnych jąder atomowych. Tak jak siła elektryczna jest przenoszona (pośredniczona) przez

¹¹⁶ *Charge, Parity, Time* (ang.) - ładunek, parzystość, czas (przyp. tłum.).

¹¹⁷ Fragment ten jest w dużej mierze oparty na podejściu zastosowanym przez Paula Daviesa w jego książce *The Forces of Nature* [Siły natury], wydanej przez Cambridge University Press w 1979 roku.

fotony, wydaje się, że siła słaba musi być przenoszona przez jej własny bozon. Sytuacja jest jednak bardziej skomplikowana, gdyż w reakcjach słabego oddziaływania musi być przekazywany ładunek elektryczny, więc słaby bozon („foton” słabego pola) musi nieść ładunek. Muszą zatem faktycznie istnieć co najmniej dwie takie cząstki - bozony ochrzczone W^+ i W^- , a ponieważ w oddziaływaniach słabych nie zawsze zachodzi transfer ładunku, powstała więc konieczność odwołania się do trzeciego pośrednika - neutralnego bozonu Z , aby uzyskać komplet „słabych fotonów”. Ku początkowemu zakłopotaniu fizyków teoria wymagała istnienia tych cząstek. Nie mieli oni żadnych doświadczalnych dowodów na ich istnienie.

Poprawne matematyczne symetrie związane ze słabym oddziaływaniem, z dwiema¹¹⁸ naładowanymi cząstkami W oraz neutralną cząstką Z , zostały po raz pierwszy sformułowane przez Sheldona Glashowa z Uniwersytetu Harvarda i opublikowane w 1961 roku. Jego praca zawierała pewne luki, ale stworzyła możliwość połączenia oddziaływań słabych i elektromagnetycznych w jedną, ogólniejszą teorię. Największy problem nastroczał fakt, że teoria wymagała, aby cząstki W nie tylko były obdarzone ładunkiem - w odróżnieniu od fotonu - ale także miały niezerową masę, co uniemożliwiałoby zrenormalizowanie teorii oraz niweczyło analogię z elektromagnetyzmem, gdzie foton jest bezmasowy. Cząstki W muszą mieć masę, ponieważ słabe oddziaływanie ma mały zasięg - gdyby nie miały masy, to zasięg byłby nieskończony, tak jak zasięg oddziaływania elektromagnetycznego. Problem w zasadzie wiąże się nie tyle z samą masą, ile ze spinem cząstek. Zgodnie z regułami kwantowymi wszystkie cząstki bezmasowe, takie jak foton, mogą mieć spin skierowany tylko równoległe lub antyrównoległe do kierunku ich ruchu. Cząstka obdarzona masą, na przykład W , może także nieść swój spin prostopadle do kierunku ruchu i właśnie ten dodatkowy stan spinowy jest źródłem wszystkich problemów. Gdyby cząstki W były bezmasowe, to zachodziłby pewien rodzaj symetrii między fotonem a W , a zatem także między oddziaływaniem słabym a elektromagnetycznym, co pozwoliłoby połączyć je w jedną renormalizowalną teorię wyjaśniającą obie siły. Symetria ta jest „złamana”, co stanowi główny powód powstawania problemów.

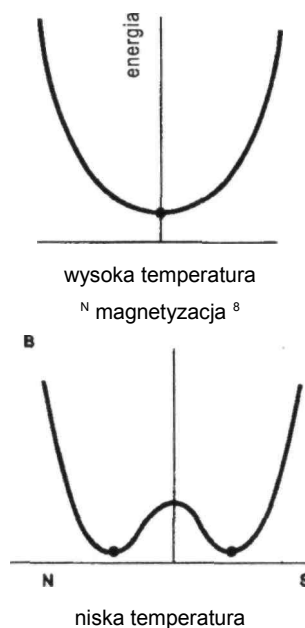
W jaki sposób matematyczna symetria może być złamana? Najlepszy przykład zaczerpnięty jest z magnetyzmu. Można przyjąć, że sztabka materiału magnetycznego zawiera olbrzymią liczbę małych wewnętrznych magnesów, odpowiadających pojedynczym atomom. Gdy materiał magnetyczny jest gorący, to te małe magnesy wirują i potracają się wzajemnie w całkowitym bezładzie, zmiierzają we wszystkich możliwych kierunkach, skutkiem czego wypadkowe pole magnetyczne wokół sztabki wynosi zero - nie ma magnetycznej asymetrii. Ale gdy sztabkę schłodzić poniżej pewnej temperatury, zwanej temperaturą Curie, nagle pojawia się stan namagnesowania - wszystkie wewnętrzne magnesy ustawiają się w jednym kierunku. W wysokiej temperaturze najniższy możliwy stan energetyczny odpowiada zerowej magnetyzacji; w niskiej temperaturze w najniższym stanie energii wewnętrzne magnesy ustawiają się w jednym kierunku (nie jest istotne, w którym). Symetria zostaje złamana, ponieważ w wysokich temperaturach

¹¹⁸ Cząstki W^+ i W^- mogą oczywiście być traktowane jako jedna cząstka i jej antycząstka, podobnie jak elektron (e^-) i pozytron (e^+). W ma także inną nazwę, a mianowicie pośredniczący bozon wektorowy.

energia termiczna atomów przeważa nad siłami magnetycznymi, podczas gdy w niskich temperaturach siły magnetyczne przeważają nad termicznym pobudzeniem atomów.

Pod koniec lat sześćdziesiątych Abdus Salam z Imperial College w Londynie i Steven Weinberg z Harvardu niezależnie od siebie stworzyli model oddziaływania słabego, który opierał się na matematycznej symetrii skonstruowanej przez Glashowa na początku lat sześćdziesiątych i niezależnie kilka lat później przez Salama. W tej nowej teorii złamanie symetrii wymaga istnienia nowego pola, zwanego polem Higgsa, i związanej z nim cząstki, zwanej analogicznie cząstką Higgsa. Oddziaływania elektromagnetyczne i słabe są połączone w jedno oddziaływanie o symetrycznym polu cechowania, zwanym oddziaływaniem elektroslabym, z bezmasowymi bozonami pośredniczącymi. Nieco później, w 1971 roku, duński fizyk Gerard t'Hooft opublikował pracę, w której udowodnił, że teoria ta jest renormalizowalna. Teorię potraktowano poważnie, a po tym, jak w 1973 roku pojawiły się dowody na istnienie cząstki Z, zyskała szerokie poparcie. Połączone oddziaływanie „funkcjonuje” tylko w warunkach bardzo dużej gęstości energii, jak w wielkim wybuchu, a w niższych energiach jest spontanicznie łamane w taki sposób, że pojawiają się masywne cząstki W i Z - oddziaływania elektromagnetyczne i słabe idą każde swoją drogą.

O znaczeniu nowej teorii świadczy fakt, że Glashow, Salam i Weinberg podzielili się w 1979 roku Nagrodą Nobla z fizyki, mimo że nie istniał jeszcze wtedy bezpośredni doświadczalny dowód na poprawność ich idei. Jednakże na początku 1983 roku zespół z CERN-u w Genewie ogłosił wyniki eksperymentów z oddziaływaniem cząstek przy bardzo dużych energiach (osiągniętych przez zderzenie wiązki protonów o dużej energii z wiązką antyprotonów o równie dużej energii), które potwierdziły istnienie cząstek W i Z, z masami wynoszącymi odpowiednio około 80 GeV i około 90 GeV



Ryc. E.5. Łamanie symetrii przy obniżeniu temperatury sztabki magnetycznej

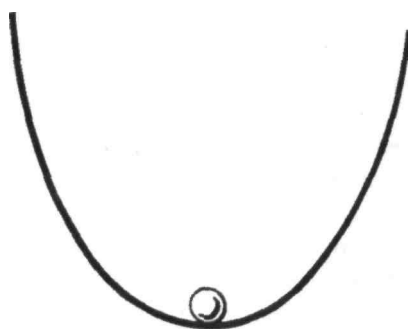
. To bardzo dobrze zgadza się z przewidywaniami teorii Glashowa-Salama-Weinberga, która tym samym jest „dobrą” teorią (czyli dającą testowalne przewidywania), w odróżnieniu od

wcześniejszej teorii Glashowa. Również teoretycy nie próżnowali. Jeśli dwa oddziaływania mogą zostać połączone w jednej teorii, to dlaczego nie spróbować stworzyć wielkiej zunifikowanej teorii łączącej wszystkie fundamentalne oddziaływania? Marzenie Einsteina staje się bliższe realizacji niż kiedykolwiek, ale nie w formie zwykłej symetrii, lecz supersymetrii i supergravitacji.

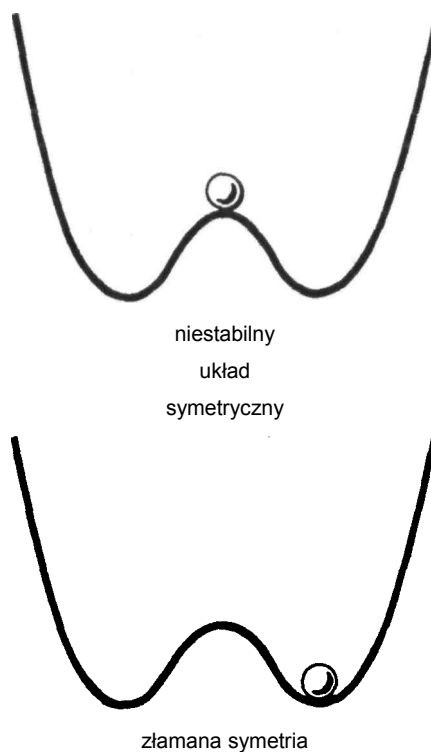
Supergravitacja

Główny problem z teoriami cechowania, poza kłopotami z renormalizacją, polega na tym, że nie są one jednoznaczne. Pojedyncza teoria cechowania zawiera nieskończoności, które muszą zostać tak dobrane przez renormalizację, aby wynik zgadzał się z rzeczywistością. Dochodzi do tego fakt, że istnieje nieskończona liczba możliwych teorii cechowania, a te z nich, które mają opisywać fizyczne oddziaływania, muszą zostać w podobny sposób dopasowane zgodnie z równie arbitralną regułą, aby dopasować wyniki do rzeczywistości. Co gorsza, w teoriach cechowania nie ma nic, co by wskazywało, jak wiele powinno być różnych rodzajów cząstek - ile barionów, ile leptonów (cząstek z tej samej rodziny co elektron), bozonów cechowania i wszelkich innych. Fizycy chcieliby mieć jednoznaczną teorię, która wymaga tylko określonej liczby cząstek określonych rodzajów, aby wyjaśnić fizyczny świat. Pierwszy krok w stronę tego typu teorii został poczyniony w 1974 roku, gdy stworzono ideę supersymetrii.

Pomysł pojawił się w pracy Juliusa Wessa z uniwersytetu w Karlsruhe i Brunona Zumino z uniwersytetu w Berkeley, którzy wyszli od hipotezy mówiącej, jak powinien wyglądać idealnie symetryczny świat - każdy fermion powinien mieć bozonowego partnera o takiej samej masie. W naturze nie widzimy co prawda tego rodzaju symetrii, ale być może da się to wyjaśnić przez złamanie symetrii, tak jak to było z symetrią związaną z oddziaływaniem elektroslabym. Gdy już uporamy się z matematyką, okazuje się, że można sformułować pewne supersymetrie, które istniały w czasie wielkiego wybuchu, ale później uległy złamaniu. Jedną z konsekwencji łamania supersymetrii jest niewielka masa zwykłych cząstek fizycznych oraz bardzo duża masa ich superpartnerów.



stabilny
układ
symetryczny



Ryc. E.6. Łamanie symetrii sztabki magnetycznej z ryciny E.5 można zrozumieć na przykładzie piłki umieszczonej w dolinie. Jeżeli jest tylko jedna dolina, to piłka znajduje się w stabilnym, symetrycznym stanie. Jeżeli są dwie doliny, to stan symetryczny jest niestabilny i piłka prędzej czy później wpadnie do jednej z nich, łamiąc symetrię układu

Supercząstki mogą zatem istnieć tylko przez bardzo krótki czas, zanim rozpadną się na różniejszych cząstek; aby w dzisiejszych warunkach można było wyprodukować supercząstki, należałoby odtworzyć warunki podobne do tych, jakie panowały w wielkim wybuchu. Są to rzeczywiście bardzo wysokie energie, więc nic dziwnego, że nawet w zderzeniach wiązek protonów i antyprotonów w CERN-ie nie udało się uzyskać supercząstek.

Rozważania te wciąż mają charakter wysoce spekulatywny. Jest wszakże jeden ważny powód, dla którego warto się nimi nadal zajmować. Wciąż istnieją różne rodzaje supersymetrycznych teorii pola, różne wariacje na ten sam temat, ale ograniczenia narzucane przez symetrie oznaczają, że każda wersja teorii dopuszcza istnienie tylko określonej liczby rodzajów cząstek. Niektóre wersje zawierają setki różnych podstawowych cząstek, co jest dosyć zniechęcającą perspektywą na przyszłość, ale inne dopuszczają ich znacznie mniej, a żadna teoria nie przewiduje możliwości istnienia nieskończonej liczby „podstawowych” cząstek. Co więcej, w każdej teorii supersymetrycznej cząstki grzecznie grupują się w rodziny. W najprostszej wersji jest tylko jeden bozon, ze spinem zero, i jeden partner o spinie 1/2; bardziej skomplikowana wersja zawiera dwa bozony o spinie 1, jeden fermion o spinie 1/2, jeden o spinie 3/2 i tak dalej. Jednak najlepsza wiadomość jeszcze przed nami. W teoriach supersymetrycznych nie zawsze trzeba się martwić o renormalizację. W niektórych z nich nieskończoności znoszą się same, nie ad hoc, stosując się do prawidłowych reguł matematyki i dając w wyniku sensowne skończone liczby.

Supersymetrie dobrze rokują na przyszłość, ale nie jest to jeszcze ostateczna odpowiedź. Czegoś tu wciąż brak, a fizycy nie wiedzą, co to jest. Różne teorie całkiem dobrze pasują do

niektórych własności rzeczywistego świata, ale żadna z teorii supersymetrycznych nie wyjaśnia wszystkiego. Mimo to jest jedna szczególna teoria supersymetryczna, która zasługuje na osobną wzmiankę. Nazywa się supergrawitacja $N = 8$.

Supergrawitacja zakłada istnienie hipotetycznej cząstki, grawitonu, który niesie pole grawitacyjne. Oprócz niego jest osiem innych cząstek (stąd $N = 8$), zwanych grawitinami, 56 „prawdziwych” cząstek, czyli kwarków i elektronów, oraz 98 cząstek związanych z przenoszeniem oddziaływań (fotonów, cząstek W i wielu innych gluonów). Jest to mnóstwo cząstek, ale dokładnie taką ich liczbę przewiduje teoria i nie ma miejsca na ani jedną więcej. Sprawdzenie tej teorii może nastroić kłopoty, jeżeli wziąć pod uwagę grawitina. Nigdy ich nie zaobserwowano i istnieją dwie dokładnie przeciwstawne hipotezy na to, dlaczego tak się dzieje. Grawitina mogą się okazać nieuchwytnymi, widmowymi cząstkami o bardzo małej masie, nigdy z niczym nie oddziałującymi. Albo przeciwnie, mogą one być tak masywne, że nasze dzisiejsze akceleratory cząstek nie mają dostatecznej energii, aby je wytworzyć i zaobserwować. Problemy są ogromne, ale teorie takie jak supergrawitacja są przynajmniej spójne, zupełne i nie wymagają renormalizacji. Wydaje się, że fizycy są na właściwym tropie, ale jak to sprawdzić, skoro nie mamy odpowiednich akceleratorów? Z tego właśnie powodu niezwykle aktywną dziedziną nauki jest dzisiaj kosmologia, nauka o wszechświecie jako całości. Heinz Pagels, wicedyrektor Nowojorskiej Akademii Nauk, powiedział w 1983 roku: „Weszliśmy w okres rozwoju fizyki poakceleratorowej, dla której cała historia wszechświata staje się obszarem badań podstawowych w fizyce”¹¹⁹. Kosmolodzy nie mieliby nic przeciwko temu, aby zawiązać fizyką cząstek.

Czy wszechświat jest fluktuacją próżni

Nie można wykluczyć, że to kosmologia jest w istocie jedną z gałęzi fizyki cząstek, gdyż - zgodnie z pewnym pomysłem, który w ciągu ostatnich dziesięciu lat z szalonego stał się zaledwie ekstrawagancki - wszechświat, z całą swoją zawartością, może być ni mniej, ni więcej, jak tylko jedną z tych fluktuacji próżni, które pozwalają grupom cząstek wyłaniać się z nicości, istnieć przez krótką chwilę i z powrotem zniknąć w próżni. Koncepcja ta bardzo dobrze zgadza się z możliwością, że wszechświat jest grawitacyjnie zamknięty. Wszechświat, który rodzi się w ognistej kuli wielkiego wybuchu, przez pewien czas się rozszerza, a następnie kurczy z powrotem do stanu początkowego i znika w ognistej kuli, jest właśnie fluktuacją próżni, aczkolwiek na bardzo wielką skalę. Jeżeli wszechświat trwa w doskonałej równowadze pomiędzy nieskończoną ekspansją i powtórnym zapadnięciem się, to jego ujemna energia grawitacyjna musi dokładnie równoważyć dodatnią energię pochodzącą od masy całej materii. Zamknięty wszechświat ma zatem zerową energię wypadkową, łatwo jest więc stworzyć z fluktuacji próżni coś, co ma zerową energię, aczkolwiek trzeba przyznać, że nakłonienie tych wszystkich drobinek, aby rozbiegły się we wszystkie strony i uformowały w ten fascynujący i różnorodny świat, który widzimy wokół siebie, to sztuka nie lada.

¹¹⁹ Cytowane za: „Science”, 29 kwietnia 1983 roku, t. 220, s. 491.

Jestem szczególnie dumny z tej idei, ponieważ w latach siedemdziesiątych miałem pewien udział w narodzinach jej nowej wersji. Oryginalny pomysł pochodzi od Ludwiga Boltzmanna, dziewiętnastowiecznego fizyka, jednego z twórców nowoczesnej termodynamiki i mechaniki statystycznej. Boltzmann zakładał, że wszechświat powinien znajdować się w termodynamicznej równowadze, a ponieważ wyraźnie jest inaczej, to jego istnienie może być rezultatem chwilowego zaburzenia równowagi dopuszczanego przez reguły statystyczne pod warunkiem, że zachowana jest średnia równowaga w długim czasie. Szansa na pojawienie się takiej fluktuacji na skalę naszego wszechświata jest niewielka, ale jeżeli wszechświat istniał w stanie całkowitej równowagi przez nieskończenie długi czas, to prawdopodobieństwo wzrasta niemal do jednego. Tylko naruszenie równowagi pozwoliłoby na powstanie życia, więc nie ma się co dziwić, że skoro w ogóle istniejemy, to mamy rzadką okazję obserwować wszechświat poza stanem równowagi.

Pomysły Boltzmanna nigdy nie znalazły uznania, ale różne ich wersje od czasu do czasu powracały, a jedna z nich przyciągnęła moją uwagę i w 1971 roku napisałem do „Nature”, że być może wszechświat powstał w ogniu, ekspandował, a kiedyś zapadnie się z powrotem w nicość¹²⁰. Dwa lata później Edward Tryon z City University of New York przysłał do „Nature” pracę, w której rozwinął ideę wielkiego wybuchu jako fluktuacji próżni, a w załączonym liście do redakcji wspominał, że do podjęcia tego tematu zainspirował go mój anonimowy artykuł¹²¹. Jestem więc szczególnie zainteresowany tym konkretnym modelem kosmologicznym, aczkolwiek jest oczywiście słuszne, aby zasługa stworzenia nowoczesnej koncepcji wszechświata jako fluktuacji próżni została przypisana Tryonowi. Nikt wcześniej na to nie wpadł, lecz jak zauważył w owym czasie Tryon, jeżeli wszechświat ma zerową energię średnią, to dozwolony czas jego istnienia, zgodnie z

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$

może rzeczywiście okazać się bardzo długi. „Nie twierdę, że podobne do naszego wszechświaty pojawiają się często, lecz jedynie że spodziewana częstość jest niezerowa - mówi Tryon. - Logiczne jest jednak, że obserwatorzy zawsze znajdują się we wszechświatach zdolnych do stworzenia życia, a takie wszechświaty są imponująco duże”.

Przez następne dziesięć lat pomysł był ignorowany, ale ostatnio nowa jego wersja zaczęła być traktowana nieco poważniej. Wbrew początkowym nadziejom Tryona obliczenia wykazały, że jakkolwiek nowy „wszechświat kwantowy”, powstały jako fluktuacja próżni, musi rzeczywiście być zjawiskiem bardzo małym, krótkotrwałym i obejmującym niewielki obszar czasoprzestrzeni. Potem jednak kosmolodzy odkryli sposób, dzięki któremu ten mikroskopijny bąbelek ulega niesamowitej ekspansji, która w mgnieniu oka potrafi powiększyć go do rozmiarów obecnie zamieszkanego przez nas wszechświata. Nowym przebojem kosmologii lat osiemdziesiątych jest „inflacja”. Inflacja potrafi wyjaśnić, w jaki sposób maleńka fluktuacja próżni może urosnąć do rozmiarów wszechświata, w którym żyjemy.

¹²⁰ „Nature”, 1971, t. 232, s. 440.

¹²¹ Tamże, 1973, t. 246, s. 396.

Inflacja i wszechświat

Kosmolodzy od dawna interesowali się wszelkimi cząstkami, które mogą istnieć we wszechświecie, ponieważ czatują oni na „brakującą masę” potrzebną do tego, aby można było uznać wszechświat za zamknięty. Szczególnie użyteczne byłyby do tego grawitina, z ich masą około 1000 eV - nie tylko pomogłyby zamknąć wszechświat, ale zgodnie z równaniami, które opisują rozszerzanie się wszechświata od wielkiego wybuchu, istnienie takich cząstek doskonale tłumaczyłoby powstawanie skupisk materii o rozmiarach galaktyk. Neutrino z masą około 10eV tłumaczyłoby z kolei wzrost skupisk materii do skali klastrów galaktyk i tak dalej. W ciągu ostatnich kilku lat zainteresowanie kosmologów fizyką cząstek jeszcze się zwiększyło, ponieważ ostatnia interpretacja łamania symetrii sugeruje, że sam fakt łamania symetrii może być motorem procesu rozszerzania się naszego bąbelka czasoprzestrzeni.

Sam pomysł pochodzi od Alana Gutha z Massachusetts Institute of Technology i opiera się na obrazie bardzo gorącej i bardzo gęstej fazy rozwoju wszechświata, w której wszystkie oddziaływania fizyczne (oprócz grawitacji - teoria ta nie obejmuje supersymetrii) były połączone w jedno symetryczne oddziaływanie. Gdy wszechświat zaczął się ochładzać, symetria została złamana i podstawowe siły natury - elektromagnetyzm oraz silne i słabe oddziaływanie jądrowe - podążyły swoimi drogami. To oczywiste, że te dwa stany wszechświata, przed i po złamaniu symetrii, różnią się znacznie od siebie. Zmiana od jednego stanu do drugiego jest pewnego rodzaju przejściem fazowym, podobnym do przemiany zamarzającej wody w lód albo gotującej się - w parę. W odróżnieniu od tych zwykłych przejść fazowych złamanie symetrii we wczesnej fazie rozwoju wszechświata powinno, zgodnie z przewidywaniami teorii, wyzwolić niewiarygodnie dużą, odpychającą siłę grawitacyjną, która rozsadziłaby wszystko w ułamku sekundy.

Mówimy tutaj o bardzo wczesnych początkach rozwoju wszechświata, przed upływem 10^{-35} części sekundy, gdy „temperatura” wynosiła powyżej 10^{28} kelwinów, jeśli temperatura ma w ogóle jakiegokolwiek znaczenie dla tego rodzaju stanu. Ekspansja spowodowana przez złamanie symetrii byłaby eksponencjalna, podwajając rozmiary każdej objętości przestrzeni w ciągu 10^{-35} sekundy. W czasie znacznie krótszym od jednej sekundy ta niepoohamowana ekspansja rozdziłaby obszar o objętości protonu do rozmiarów obserwowalnego dzisiaj wszechświata. Następnie wewnątrz tego rozszerzającego się obszaru powstałyby bąble tego, co uważamy za normalną czasoprzestrzeń, które powiększałyby się na skutek dalszych przejść fazowych.

Pierwotna koncepcja inflacyjnego wszechświata, stworzona przez Gutha, nie zawierała prób wyjaśnienia, skąd wziął się początkowy maleńki bąbel. Mimo to pomysł połączenia jej z fluktuacją próżni, podobną do proponowanej przez Tryona, jest bardzo intrygujący.

Ta dramatyczna wersja powstania wszechświata rozwiązuje wiele kosmologicznych zagadek. Przede wszystkim spośród wszystkich możliwych prędkości rozszerzania się nasz bąbel wybrał akurat tę, która znajduje się dokładnie na granicy między układem otwartym i zamkniętym. Scenariusz inflacyjnego wszechświata wymusza dokładnie ten stan dynamicznej równowagi, na mocy zależności między gęstością masy/energii bąbla a siłą inflacyjną. Jeszcze bardziej frapujący

jest fakt, że scenariusz ów przyznaje nam we wszechświecie zupełnie marginalną rolę, umieszczając wszystko to, co widzimy wokół nas, wewnątrz bąbla, który z kolei znajduje się wewnątrz innego bąbla, tworzącego pewną większą rozszerzającą się całość.

Żyjemy w podniecających czasach, być może czeka nas - jak przewidział Dirac - równie znaczący przełom w rozumieniu wszechświata jak przejście od atomu Bohra do mechaniki kwantowej. Szczególnie intrygujące wydaje mi się to, że moje poszukiwania kota Schrödingera doprowadziły na koniec do rozważań na temat wielkiego wybuchu, kosmologii, supergrawitacji i inflacyjnego wszechświata, ponieważ w poprzedniej książce, *Spacewarps*, zacząłem od opowieści o grawitacji i ogólnej teorii względności, a skończyłem w tym samym miejscu co teraz. Ani wtedy, ani teraz nie było to zaplanowane z góry, z czego by wynikało, że supergrawitacja jest naturalnym punktem dojścia. Być może oznacza to, że unifikacja teorii kwantowej i grawitacji jest już blisko. Ale nie ma na razie widoków na szybki finał i mam nadzieję, że nigdy nie będzie. Jak stwierdził Richard Feynman: „Jednym ze sposobów na zakończenie nauki byłoby ograniczenie eksperymentów do dziedzin, w których prawa są znane”. Fizyka jest drażnieniem nieznanego, natomiast

to czego potrzebujemy, to wyobrażenia, lecz ujęta w żelazne karby. Musimy znaleźć nowy pogląd na świat, który byłby zgodny ze wszystkim, co wiemy, a zarazem zawierałby sprzeczności w swych przewidywaniach - w przeciwnym razie byłby mało interesujący. W tej sprzeczności musi zgadzać się z naturą. Jeśli potrafisz znaleźć jakikolwiek inny pogląd na świat, zgodny w całym dotychczas obserwowanym obszarze, ale niezgodny gdzie indziej, to dokonałeś wielkiego odkrycia. To jest prawie niemożliwe, choć niezupełnie...¹²²

Jeżeli żywot fizyki kiedykolwiek osiągnie koniec, to świat będzie znacznie mniej interesującym miejscem niż obecnie, więc jestem szczęśliwy, że mogę pozostawić czytelnika z nie dokończonymi wątkami, niepojętymi sugestiami i perspektywą dalszych opowieści, równie intrygujących jak historia kota Schrödingera.

¹²² R. Feynman, *The Character of Physical Law*, s. 171.

Bibliografia

Oto książki, które przeczytałem w trakcie swoich poszukiwań prawdy o kocie Schrödingera. Nie było moim celem sporządzenie wyczerpującej bibliografii teorii kwantowej. Ekspersi bez wątpienia zauważą brak pewnych tytułów, których mogliby się tutaj spodziewać. Jednak każda z tych pozycji odsyła do wielu innych i czytelnik będzie mógł dotrzeć do wszystkiego, co kiedykolwiek zostało napisane na temat teorii kwantowej, jeśli zacznie od którejkolwiek spośród niżej wymienionych książek i będzie kierować się własną intuicją. Teksty faktograficzne pozwoliłem sobie uzupełnić kilkoma tytułami z półki z fantastyką naukową, starając się wybrać te pozycje, które dobrze się czyta, ale które zawierają także informacje na temat kwantów, ze szczególnym uwzględnieniem teorii wielu światów.

TEORIA KWANTOWA

A. d'Abro, *The Rise of the New Physics* [Kariera nowej fizyki] t. 2, Dover-New York 1951 (wyd. I: 1939).

Wyczerpujące omówienie dla niespecjalistów. Tom pierwszy omawia tło historyczne i podstawy matematyczne, tom drugi jest w całości poświęcony teorii kwantowej. Nieco staroświecki styl nie ułatwia czytania, ale temat jest potraktowany bardzo szczegółowo i solidnie (oba tomy liczą łącznie 982 strony). Lektura warta polecenia dla czytelnika gotowego zgłębić matematykę.

Kenneth Atkins, *Physics - Once Over - Lightly* [Fizyka raz a lekko], Wiley, New York 1972.

W zamierzeniu autora jest to podręcznik dla jednosemestralnego kursu fizyki dla studentów innych specjalności. Jest na tyle interesująco i jasno napisany, że można go polecić także szerszej publiczności. W kategorii poważnego przewodnika po fizyce dla niespecjalistów jest to najlepsza książka na rynku. Zawiera m.in. wprowadzenie do teorii względności, mechaniki kwantowej, fizyki jądrowej i fizyki cząstek. Implikacje filozoficzne i znaczenie kwantowej rzeczywistości są wprawdzie potraktowane bardzo pobieżnie, lecz książka daje wystarczające podstawy teorii, aby zainteresowany czytelnik mógł spróbować swych sił na prostych problemach z mechaniki kwantowej. Zdecydowanie godna polecenia.

Ted Bastin (red.), *Quantum Theory and Beyond* [Teoria kwantowa i nie tylko], Cambridge University Press, New York 1971.

Oparta na materiałach z nieformalnego konwersatorium, które odbyło się w Cambridge w 1968 roku. Dyskusja i rozważania o możliwości zasadniczej „zmiany paradygmatu” w teorii kwantowej. Tekst w znacznej części trudny i o bardziej filozoficznym charakterze niż większość wymienionych tutaj książek.

Max Born, *The Restless Universe* [Niespokojny wszechświat], Dover-New York 1951.

Najlepszy wykład z nowej fizyki autorstwa jednego z czołowych twórców teorii kwantowej. Nie jest to historia rozwoju mechaniki kwantowej, lecz raczej pozycja popularnonaukowa. Szczególnie warta polecenia ze względu na jedną z pierwszych prezentacji interpretacji statystycznej (za tę

interpretację Born otrzymał później Nagrodę Nobla) dla laika. Na uwagę zasługują rozkładane trójwymiarowe komiksy, które posłużyły jako ilustracja procesów dynamicznych.

Max Born, *The Born-Einstein Letters* [Korespondencja Borna i Einsteina], Macmillan, London 1971.

Korespondencja dwóch wybitnych uczonych, zawierająca komentarz Borna. Przedstawia wiele interesujących ubocznych wątków teorii kwantowej, jak również odzwierciedla niechęć Einsteina wobec interpretacji kopenhaskiej.

Louis de Broglie, *Matter and Light* [Materia i światło], Norton, New York 1939 (przekład z oryginału francuskiego, wydane w 1937 roku; dostępne także w wydaniu broszurowym).

W przeważającej części pozycja historyczna. Sprawozdanie z narodzin nowej fizyki napisane przez jednego z jej twórców.

Louis de Broglie, *The Revolution in Physics* [Rewolucja w fizyce], Greenwood Press, New York 1969.

Niezbyt udany przekład kolejnej francuskiej książki, także głównie historycznej.

Fritjof Capra, *The Tao of Physics*, Bantam, New York 1980 [*Tao fizyki. W poszukiwaniu podobieństw między fizyką współczesną a mistycyzmem Wschodu*, przeł. Paweł Macura, Zakład Wydawniczy NOMOS, Kraków 1994].

Pierwsza spośród książek, w których współczesną fizykę cząstek łączy się z filozofią, mistycyzmem i religią Wschodu. Capra jest fizykiem i snuje przekonującą opowieść o podstawowych koncepcjach teorii kwantowej (ale nie w kontekście historycznym).

Jeremy Cherfas, *Man Made Life* [Sztuczne życie], Blackwell, Oxford 1982.

Przystępne wprowadzenie do tajemnic inżynierii genetycznej, jej możliwości i ograniczeń.

Barbara Lovett Cline, *The Questioners* [Badacze], Crowell, New York 1965.

Historia mechaniki kwantowej w aspekcie biograficznym. Zawiera rozdziały o Rutherfordzie, Plancku, Einsteinie, Bohrze, Paulim i Heisenbergu. Doskonała lektura, bardzo dużo faktów historycznych, minimalna dawka fizyki.

Francis Crick, *Life Itself* [Życie], Simon & Schuster, New York 1982.

Przystępne wprowadzenie do struktury materii ożywionej. Omówienie hipotezy, że życie na Ziemi pojawiło się z kosmosu.

Paul Davies, *The Accidental Universe* [Przypadkowy wszechświat], Cambridge University Press, New York 1982.

Przejrzysta matematyczna analiza kosmicznych „zbiegów okoliczności”, które doprowadziły do powstania życia i w konsekwencji nas samych; również krótka wzmianka na temat związku między interpretacją mechaniki kwantowej Everetta a zasadą antropiczną. Inna pozycja tego samego autora, popularnonaukowa książka *Other Worlds* [Inne światy] (Dent, London 1980) zawiera pozbawioną matematyki analizę samej zasady antropicznej.

Bryce DeWitt, Neill Graham (red.), *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* [Interpretacja wielu światów mechaniki kwantowej], Princeton University Press, 1973.

Zbiór przedruków najważniejszych artykułów, w których sformułowane są podstawy teorii wielu światów. Zawiera pracę doktorską Everetta, publikacje Everetta i Wheelera w „Reviews of Modern Physics” z 1957 roku, późniejsze próby DeWitta i Grahama rozszerzenia i spopularyzowania teorii, a także inne prace.

Paul Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics* [Podstawy mechaniki kwantowej], Oxford University Press, New York 1982.

Do dziś niedościgniony tekst dla prawdziwie zainteresowanych. Wielokrotnie zmieniany i rozszerzany. Zawiera rozdział o elektrodynamice kwantowej. W części wstępnej niezwykle klarowne omówienie nieoznaczoności, superpozycji i niezbędności mechaniki kwantowej. Nawet dla czytelnika w niewielkim stopniu zainteresowanego teorią kwantową lektura pierwszego rozdziału warta jest spaceru do biblioteki. Metoda Diraca jest bardziej logiczna i czytelna niż w większości obecnie dostępnych tekstów, a wyprowadzenie interpretacji Schrödingera i Heisenberga z matematycznej struktury teorii jest bardziej logiczne i zrozumiałe, niż zazwyczaj spotyka się we współczesnych wykładach.

Paul Dirac, *Directions in Physics* [Kierunki w fizyce], Wiley, New York-London 1978.

Wykłady wygłoszone w Australii i Nowej Zelandii w 1975 roku. Nieocenione jako pogląd ostatniego żyjącego spośród uczonych, którzy stworzyli mechanikę kwantową w latach dwudziestych. Szczególnie godne polecenia ze względu na atrakcyjny i klarowny styl autora. Zawiera m.in. omówienie koncepcji zmieniającej się w czasie stałej grawitacji oraz monopoli magnetycznych, jednego z wielu nie rozwiązanych problemów współczesnej fizyki.

Arthur Eddington, *The Nature of the Physical World* [Natura fizycznego świata], Folcroft Library Editions, Folcroft, Pennsylvania 1935.

Tekst oparty na serii wykładów wygłoszonych w 1927 roku w Edynburgu. Pisana w czasie, gdy teoria wciąż przechodziła głębokie przemiany. Książka daje rzadką możliwość gruntownego poznania wpływu, jaki teoria kwantowa wywarła na jeden z wielkich umysłów lat dwudziestych. Eddington był nie tylko jednym z najwybitniejszych uczonych, ale także jednym z pierwszych i najlepszych popularyzatorów nauki.

Arthur Eddington, *Science and the Unseen World* [Nauka i niewidoczny świat], Folcroft Library Editions, Folcroft, Pennsylvania, 1979.

Dalsze materiały z wykładów z tego samego okresu.

Arthur Eddington, *New Pathways in Science*, Cambridge University Press, 1935 [*Nauka na nowych drogach*, przeł. Szczepan Szczeniowski, Wyd. Trzaska, Evert i Michalski, Warszawa 1937].

Seria wykładów wygłoszonych na Cornell University w 1934 roku. Wyraźnie ukazany postęp, jaki poczyniono od czasu, gdy ukazała się książka Eddingtona *The Nature of the Physical World*.

Arthur Eddington, *The Philosophy of Physical Science* [Filozofia nauk fizycznych], University of Michigan Press, Ann Arbor 1958 (pierwotnie wydana przez Cambridge University Press w 1938 roku).

Kolejne wykłady wygłoszone pod koniec lat trzydziestych. Jak sugeruje tytuł, pozycja o nieco bardziej filozoficznych ambicjach.

Leonard Eisenbud, *The Conceptual Foundations of Quantum Mechanics* [Koncepcyjne podstawy mechaniki kwantowej], Van Nostrand Reinhold, New York 1971.

Minimum matematyki, co oznacza jednak całkiem sporo. Nacisk na znaczenie teorii kwantowej w fizyce. Dobry przewodnik po podstawach teorii. Nie wdając się w omawianie struktury atomowej ani w inne szczegóły, autor koncentruje się na fizycznych i filozoficznych aspektach zagadek kwantowego świata.

Richard Feynman, *The Character of Physical Law* [Charakter praw fizyki], MIT Press, Cambridge, Massachusetts 1967.

Tekst oparty na serii wykładów wygłoszonych na Cornell University w 1964 roku, a w 1965 roku pokazanych przez telewizję BBC2. Doskonała lektura w typowym dla Feynmana stylu. Jeden rozdział poświęcony kwantowo-mechanicznej naturze świata.

Richard Feynman, Robert Leighton, Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, t. III, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1981 [Feynmana wykłady z fizyki, przeł. Andrzej Pindor, Waldemar Gorzkowski, Andrzej Szymacha, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1974].

Najbardziej przystępne wprowadzenie do mechaniki kwantowej dla studentów. Bardzo dobre omówienie słynnego doświadczenia z dwiema szczelinami. Interesujące przedstawienie zjawiska nadprzewodnictwa.

George Gamov, *The Atom and its Nucleus* [Atom i jego jądro], Prentice-Hall, New Jersey 1961.

Łatwa lektura z dużą ilością informacji o kwantach i teorii falowej. Autor jest nie tylko znakomitym gawędziarzem, ale także współuczestnikiem historii kwantów - przez pewien czas pracował z Bohrem. Trochę staroświecka, ale zabawna i warta przeczytania.

Maurice Goldsmith, Alan Mackay, James Woudhuysen (red.), *Einstein: The First Hundred Years* [Einstein: pierwsze sto lat], Pergamon, Elmsford, New York 1980.

Składanka tekstów, m.in. doskonały artykuł C.P. Snowa o Einsteinie.

John Gribbin, Jeremy Cherfas, *The Monkey Puzzle* [Małpia zagadka], Bodley Head, London; Pantheon, New York 1982.

Książka o ewolucji ludzkości. Zawiera wyczerpujący, ale pozbawiony technicznych szczegółów opis działania DNA.

Niels Heathcote, *Nobel Prize Winners in Physics 1901-1950* [Zdobywcy Nagrody Nobla z fizyki w latach 1901-1950], Henry Schuman, Inc., 1953 (przedrukowana w 1971 przez Books for Libraries Press, Freeport, New York).

Zawiera krótkie biografie oraz streszczenia prac, za które przyznane zostały nagrody. Wymowna ilustracja dominacji teorii kwantowej w fizyce w pierwszej połowie naszego wieku. Brak tylko dwóch kluczowych nazwisk - Maxa Borna, który otrzymał nagrodę dopiero w 1954 roku, oraz Ernesta Rutherforda, który został nagrodzony w kategorii „chemia”. Warto zajrzeć.

Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, Harper & Row, New York 1959 [*Fizyka a filozofia*, przeł. Stefan Amsterdamski, Książka i Wiedza, Warszawa 1965].

Tekst serii wykładów wygłoszonych przez jednego z twórców mechaniki kwantowej na St. Andrews University w latach 1955-1956. Zawiera zwięzłą historię teorii kwantowej oraz omówienie interpretacji kopenhaskiej. Całkowity brak matematyki.

Werner Heisenberg, *The Physicist's Conception of Nature* [Koncepcja natury w fizyce], Greenwood Press, Westport, Connecticut, 1970 (pierwotnie wydana przez Harcourt Brace w 1958 roku).

Jeszcze jedna pozycja semifilozoficzna. Wymieniona głównie po to, aby nie mylić jej z książką Jagdish Mehry o takim samym tytule! (patrz niżej).

Werner Heisenberg, *Physics and Beyond* [Fizyka i co dalej], Harper & Row, New York; Allen & Unwin, London 1971.

Z podtytułem „Wspomnienia z życia nauką”. Autobiografia z niewielką ilością nauki. Postać Heisenberga jako człowieka.

Banesh Hoffmann, *The Strange Story of the Quantum* [Dziwna historia kwantu], Peter Smith, Magnolia, Massachusetts 1963 (wyd. I: 1947).

Interesujące spojrzenie na teorię kwantową z perspektywy lat czterdziestych. Autor czasami wpada w pułapkę nadmiernego uproszczenia, gubiąc logikę wyvodu w wyniku prób utrzymania się w konwencji codziennego języka. Mimo to po czterdziestu latach wciąż jest to interesująca lektura. Warta przeczytania choćby dla samego posłowia, gdzie w klarowny sposób przedstawione są osiągnięcia minionej dekady. łącznie z diagramami Feynmana i problemem przyczynowości w fizyce.

Ernest Ikenberry, *Quantum Mechanics* [Mechanika kwantowa], Oxford University Press, London 1962.

Podręcznik dla matematyków i fizyków, technicznie za trudny dla niespecjalistów. Bardzo dobry jako poradnik zastosowań teorii kwantowej do rozwiązywania konkretnych problemów. Słaby, jeśli chodzi o interpretację teorii kwantowej.

Max Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics* [Pojęciowy rozwój mechaniki kwantowej], McGraw-Hill, New York 1966.

Bardzo szczegółowe jednotomowe studium. Matematyka skomplikowana, ale poza tym sporo znakomitego materiału. Nawet jeśli się pominie wywody matematyczne, lektura bardzo ciekawa.

Max Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics* [Filozofia mechaniki kwantowej], Wiley, New York-London, 1974.

Książka poświęcona interpretacji mechaniki kwantowej oraz jej filozoficznemu znaczeniu. Trochę za dużo nieciekawych szczegółów, m.in. na temat interpretacji kopenhaskiej. Wybiega daleko poza przepisy kuchni kwantowej.

Pascual Jordan, *Physics of the 20th Century* [Fizyka XX wieku], Philosophical Library, New York 1944.

Podobnie jak wymienione wyżej książki de Broglie'a jest to pozycja o charakterze historycznym, napisana przez jednego z głównych twórców dwudziestowiecznej fizyki.

Horace Judson, *The Eighth Day of Creation* [Ósmy dzień stworzenia], Simon & Schuster, 1982.

Ta opasła i nieco chaotycznie napisana książka interesująco przedstawia rozwój biologii molekularnej w drugiej połowie dwudziestego wieku. Warto ją przeczytać zarówno ze względu na samą historię biologii molekularnej, jak i na barwne opisy pracy naukowców. Ścisły związek poruszanej tam tematyki z rewolucją kwantową uwidacznia się szczególnie wyraźnie, gdy Judson podkreśla, że narodziny biologii molekularnej nastąpiły w momencie, gdy Linus Pauling zastosował reguły mechaniki kwantowej do zbudowania podstaw chemii złożonych cząsteczek. Niestety Judson stwierdza także, że wersje mechaniki kwantowej stworzone przez Heisenberga, Borna i Diraca powstały później niż wersja Schrödingera. Nikt nie jest doskonały.

Jagdish Mehra (red.), *The Physicist's Conception of Nature* [Koncepcja natury w fizyce], Kluwer, Boston 1973.

Materiały z sympozjum zorganizowanego w 1972 roku w Trieście dla uczczenia siedemdziesiątych urodzin Paula Diraca. Zapierająca dech lista uczestników - czyta się ją jak *Who Is Who* teorii kwantowej - uczyniła z tego epickiego 839-stronicowego tomu jedno z najlepszych wprowadzeń (ale raczej dla czytelnika z przygotowaniem naukowym) do transformacji, której uległa fizyka w dwudziestym wieku.

Jagdish Mehra, Helmut Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory* [Historyczny rozwój teorii kwantowej], Springer-Verlag, New York 1982.

Niedoścignione studium historyczne fizyki kwantowej. Do tej pory ukazały się cztery tomy, w których autorzy doszli do roku 1926; w następnych pięciu tomach zamierzają doprowadzić swą opowieść aż do czasów współczesnych. Ta epicka praca nie cofa się nawet przed najbardziej skomplikowaną matematyką, lecz obszerny i bardzo klarowny tekst ułatwia zrozumienie licznych równań.

Abraham Pais, *Subtle is the Lord...* [Bóg jest subtelny...], Oxford University Press, London-New York 1982.

Najlepsze studium życia i pracy Einsteina.

Heinz Pagels, *The Cosmic Code* [Kosmiczny szyfr], Simon & Schuster, New York 1982.

Śmiała próba wyjaśnienia teorii względności, mechaniki kwantowej i teorii cząstek, napisana przez fizyka specjalizującego się w teorii cząstek elementarnych. Zasadniczą treścią książki jest szczegółowy opis cząstkowego zoo - kwarków, gluonów i całej reszty. Teoria kwantowa jest potraktowana nieco bardziej pobieżnie - jako tło niezbędne do zrozumienia natury cząstek - i w perspektywie ahistorycznej. Dobre źródło wiedzy o licznych przedstawicielach cząstkowego zoo. *The Cosmic Code* wypada interesująco w zestawieniu z książkami Capry i Zukava.

Jay M. Pasachoff, Marc L. Kutner, *Invitation to Physics* [Zaproszenie do fizyki], W.W. Norton, New York-London 1981.

W zamierzeniu autora jest to podręcznik fizyki dla studentów kierunków innych niż ścisłe, ale w gruncie rzeczy jest to omówienie całej fizyki na przystępnym poziomie z ograniczonym materiałem matematycznym. Można je śmiało polecić każdemu, kto się interesuje współczesną nauką.

Max Planck, *The Philosophy of Physics* [Filozofia fizyki], W.W. Norton, New York 1963 (wyd. I: 1936).

Książka wyłącznie o charakterze historycznym. Pozwala poznać sposób rozumowania człowieka, który stworzył kwantową teorię promieniowania - początkowo nie zdając sobie sprawy z doniosłości uczynionego przez siebie kroku.

Erwin Schrödinger, *Collected Papers on Wave Mechanics* [Dzieła zebrane o mechanice falowej], Chelsea Publishing Company, New York 1978 (tłumaczenie wydania niemieckiego z 1928 roku).

Podstawowe prace Schrödingera, w których sformułował podstawy mechaniki falowej, łącznie z analizą, w której wykazał równoważność mechaniki macierzowej i falowej. Główne publikacje o mechanice macierzowej zostały zebrane w monografii van der Waerdena (patrz niżej).

Erwin Schrödinger, *What is Life?* [Co to jest życie?], Cambridge University Press, New York 1967 (wyd. I: 1944; do obecnego wydania dołączono tekst, który ukazał się osobno w 1958 roku jako *Mind and Matter* [Myśl i materia]).

Pięknie napisana książka o charakterze głównie historycznym. Wywarła olbrzymi wpływ na ludzi, którzy odkryli strukturę żywych cząsteczek. Nadal warta przeczytania, aczkolwiek teraz już wiemy, że cząsteczką życia jest DNA oraz że geny nie składają się z białek, jak sądził Schrödinger w trakcie pisania tej książki. Żadna inna książka lepiej nie przekona czytelnika, że teoria kwantowa jest kluczem do inżynierii genetycznej.

Erwin Schrödinger, *Science, Theory and Man* [Nauka, teoria i człowiek], Dover Publications/Allen and Unwin, London 1957 (wyd. I: 1935).

Zawiera mowę noblowską Schrödingera. Bardzo przystępna i klarowna lektura - warta polecenia każdemu, kto interesuje się rozwojem mechaniki kwantowej.

Erwin Schrödinger, *Letters on Wave Mechanics* [Listy o mechanice falowej], Philosophical Library, New York 1967.

Listy do i od Schrödingera. Pozostali adresaci to Einstein, Planck i Lorentz. Intrygujący historyczny obraz umysłowości tych wielkich twórców, m.in. korespondencja na temat paradoksu kota.

John Slater, *Modern Physics* [Nowoczesna fizyka], McGraw-Hill, New York 1955.

Książka z niewielką ilością matematyki. Mimo to, i chociaż powstała tyle lat temu, wciąż jest to znakomite wprowadzenie do teorii kwantowej dla studentów.

J. Gordon Stipe, *The Development of Physical Theories* [Rozwój teorii fizycznych], McGraw-Hill, New York 1967.

Wprowadzenie do fizyki na poziomie pierwszego roku uniwersytetu. W odróżnieniu od wielu tego typu książek zawiera dobre wprowadzenie do teorii kwantowej i fizyki jądrowej. Nie jest to pozycja popularnonaukowa, lecz podręcznik akademicki.

B.L. van der Waerden (red.), *Sources of Quantum Mechanics* [Źródła mechaniki kwantowej], Peter Smith, Magnolia, Massachusetts 1967.

Zbiór najważniejszych publikacji (wszystkie w wersji angielskojęzycznej), w których zostały przygotowane i sformułowane podstawy mechaniki macierzowej (prace Heisenberga, Borna, Jordana i Diraca). Nie zawiera mechaniki falowej Schrödingera (o tym osobna publikacja Schrödingera - patrz wyżej). Zwięzłe, lecz wyczerpujące wprowadzenia przedstawiają każdą prezentowaną pracę w odpowiednim kontekście.

James D. Watson, *The Double Helix*, Atheneum, New York 1968 [*Podwójna Helisa*].

Relacja naoczna o wykryciu struktury DNA, przeł. Włodzimierz Zagórski, Wiedza Powszechna, Warszawa 1975].

Błyskotliwy i żywy opis odkrycia struktury DNA. Zawiera więcej anegdot niż analiz naukowych, co nie zmienia faktu, że jest to fascynująca i warta przeczytania książka.

Harry Woolf (red.), *Some Strangeness in the Proportion* [Nieco dziwna proporcja], Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1980.

Materiały z sympozjum zorganizowanego w Institute for Advanced Study [Uniwersytet Princeton] dla uczczenia setnej rocznicy urodzin Alberta Einsteina. Listę uczestników czyta się jak *Who Is Who* teoretycznej fizyki. Zawiera obszerny rozdział o wkładzie Einsteina w teorię kwantową. Chociaż zasadniczo niematematyczny, jest to tekst na bardzo zaawansowanym poziomie, nie dla przygodnego czytelnika.

Gary Zukav, *The Dancing Wu Li Masters* [Tańczący mistrzowie Wu Li], Bantam, New York, 1980.

Jest to w pewnym sensie odpowiednik *Tao fizyki* Capry. Opowiada tę samą historię widzianą oczami kogoś, kto nie jest zawodowym fizykiem. Wszyscy naukowcy powinni to przeczytać, aby wyrobić sobie pojęcie o tym, jak reszta społeczeństwa rozumie nową fizykę. Czytelnikowi bez przygotowania naukowego winien jestem ostrzeżenie, że Zukav niekiedy daje się ponieść entuzjazmowi, że nauka nie zawsze jest przedstawiona stuprocentowo rzetelnie oraz że Zukav, podobnie jak Capra, poświęca niewiele uwagi samemu rozwojowi koncepcji fizycznych. Mimo to jest to bardzo dobra lektura.

LITERATURA FANTASTYCZNO-NAUKOWA

Gregory Benford, *Timescape* [Czasobraz], Pocket Books, New York 1981.

Najlepszy portret fizyka, jaki znalazłem na półce z fantastyką, połączony z doskonałym ukazaniem tego rodzaju podróży w czasie, które mogą się okazać możliwe w rzeczywistości wielu światów.

Philip Dick, *The Man in the High Castle*, Gregg Press, Boston 1979 [*Człowiek z wysokiego zamku*, przeł. Lech Jęczynek, Zysk i S-ka Wydawnictwo, Poznań 1996],

Osadzona w rzeczywistości wielu światów historia, w której Stany Zjednoczone przegrały drugą wojnę światową. Ładnie napisana książka, bez nadmiaru szczegółów naukowych, odbiegająca od utartych konwencji fantastyki naukowej.

Randall Garrett, *Too Many Magicians* [Zbyt wielu sztukmistrzów], Ace Books, New York 1981.

Opowieści z kategorii „co by było, gdyby”, osadzone w rzeczywistości równoległych światów, gdzie Ryszard Lwie Serce żył dostatecznie długo, aby zapobiec objęciu tronu angielskiego przez swego brata Jana. Naukowo raczej powierzchowna. Dobrze, interesujące kryminały.

David Gerrold, *The Man Who Folded Himself* [Człowiek, który się złożył], Amereon, Ltd., Mattituck, New York 1973.

Zabawny, interesujący obraz kłopotliwych skutków podróży w przód i wstecz w czasie pomiędzy różnymi światami w prostopadłej superprzestrzeni. „Nauka” w tej książce trąci szarlatanerią, ale konsekwencje są bardzo zbliżone do niektórych spośród idei, które omawialiśmy w rozdziale jedenastym.

Keith Roberts, *Pavane* [Pawana¹²³], Hart-Davies, London 1968 (wydane także w wersji broszurowej przez wydawnictwo Panther).

Być może jest to historia ze światów równoległych, ale nie ma pewności. Tak czy owak, niezła.

Jack Williamson, *The Legion of Time* [Legion Czasu], Sphere, London 1977.

Opublikowana najpierw w czasopiśmie jako powieść w odcinkach, historia przygodowa utrzymana w ówczesnej konwencji fantastycznonaukowej. Wymieniam ją tutaj wyłącznie z jednego powodu - spośród wszystkich znanych mi źródeł (zarówno w dziedzinie beletrystyki, jak i literatury faktu) w tej powieści po raz pierwszy pojawia się koncepcja światów równoległych, która później uzyskała status interpretacji wielu światów mechaniki kwantowej. Istnieją oczywiście starsze historie z gatunku „co by było, gdyby”, osadzone w alternatywnych rzeczywistościach, ale Williamson użył do konstrukcji fabuły języka naukowego - zaledwie w dziesięć lat po powstaniu fundamentów mechaniki kwantowej. „Linie geodezyjne rozszczepiają się na nieskończenie wiele możliwych gałęzi pod wpływem kaprysów subatomowego indeterminizmu”. Trudno o bardziej związane ujęcie istoty rzeczy. Dopiero dziewiętnaście lat później Hugh Everett w swojej pracy doktorskiej stworzył solidne matematyczne podstawy tej koncepcji. Rzadko się zdarza, aby fantastyka naukowa wyprzedzała postęp nauki, dlatego każdy taki wypadek jest wart wzmianki.

Robert Anton Wilson, trylogia *Schrödinger's Cat* [Kot Schrödingera]: *The Universe Next Door* [Sąsiedni wszechświat], *The Trick Top Hat* [Magiczny cylinder], *The Homing Pigeons* [Gołębie pocztowe], Pocket Books, New York 1982.

Nie sposób oddać wdzięku, fantazji i pomysłowości tej trylogii, w której trzy różne odmiany teorii kwantowej (po jednej na każdy tom) są skrupulatnie wykorzystane jako tło dla trzech wersji mniej więcej tej samej fabuły, z mniej więcej tymi samymi bohaterami. Można powiedzieć, że trylogia ta jest dla teorii kwantowej tym, czym *Kwartet aleksandryjski* Lawrence'a Durrella dla teorii

¹²³ Rodzaj lanca (przyp. tłum.).

względności - ale Wilson jest zabawniejszy. Książka ma własny styl, który trzeba polubić, aby zakosztować prawdziwego smaku kwantowego świata.

Autorzy książek fantastycznonaukowych wciąż na nowo „odkrywają” teorię kwantową. Co kilka miesięcy ukazuje się nowe opowiadanie, napisane przez kogoś, kto właśnie zdał sobie sprawę z możliwości, które otwiera przed nami świat kwantów. Do najnowszych przykładów można zaliczyć *Schrödinger's Plague* [Plaga Schrödingera] Grega Beara, opublikowaną 29 marca 1982 w czasopiśmie „Analog”, oraz *Schrödinger's Cat* [Kot Schrödingera] Rudy'ego Ruckera („Analog”, 30 marca 1981). Istnieje wiele innych równie dobrych opowiadań, ale wymieniam te dwa dlatego, że w obu pojawił się kot Schrödingera jako przynęta dla czytelników nie obeznanych z teorią kwantową. Ich lektura zainspirowała mnie do poszukiwań i uściśleń, które doprowadziły w rezultacie do napisania niniejszej książki, a także podsunęła mi tytuł. Dziękuję obu autorom oraz Stanowi Schmidtowi, wydawcy pisma „Analog”.