

Kontynuacja książki *W poszukiwaniu kota Schrödingera* - wyjaśnienie tajemnic światła. Autor przedstawia najnowsze odkrycia związane z naturą światła - podstawowego zjawiska zarówno w mechanice kwantowej, jak i w teorii względności. Podróże tytułowych kotków na przeciwległe krańce wszechświata znakomicie ilustrują zdumiewające paradoksy nowego spojrzenia na rzeczywistość. O ich losie decydują sygnały biegnące szybciej niż światło, a także wstecz w czasie przez tajemniczy świat kwantów pełen fotonów, które w tej samej chwili potrafią się znajdować w dwóch miejscach. Odkrycia te nie są jedynie przedmiotem zainteresowania teoretyków. Praktyczne zastosowania są równie zaskakujące. Gribbin pokazuje, w jaki sposób teoria kwantowa doprowadziła do niemożliwych do złamania szyfrów, a w przyszłości, być może, pozwoli na skonstruowanie maszyny teleportującej.

John Gribbin

Kotki Schrodingera

czyli poszukiwanie rzeczywistości

Przekład Jacek Bieroń

Tytuł oryginału *Schrödinger's kittens and the search for reality*

Konsultacja merytoryczna prof. dr hab. Wojciech Gawlik

Uniwersytet Jagielloński w Krakowie

Spis treści

Podziękowania

Wstęp

Prolog: **Problem**

Fantastyczne światło Elektronowa interferencja Standardowy punkt widzenia Głębokie wody Kot w pudle Inny aspekt rzeczywistości Potomstwo kota Schrödingera

Rozdział pierwszy: **Antyczne światło**

Pierwszy nowoczesny uczony Od Woolsthorpe do Cambridge i z powrotem W cieniu Newtona Newtona pogląd na wszechświat Pomysły Younga Fresnel, Poisson i plamka Uczeń introligatora Pola Faradaya Magiczne kolory Zdumiewające równania Maxwella

Rozdział drugi: **Czasy współczesne.**

Śmierć eteru W stronę szczególnej teorii względności Geniusz Einsteina Szybciej niż światło/wstecz w czasie Wkracza foton Człowiek, który nauczył Einsteina liczyć fotony Osobliwa teoria światła i materii Triumf QED Światło przyszłości

Rozdział trzeci: **Dziwne, lecz prawdziwe**

Zobaczyć niemożliwe światło Wyjaśnianie światła Dwoi się w oczach Coś za nic „Teleportuj mnie na pokład, Scotty” Kwantowa kryptografia Wnętrze fotonu Obserwując kwantowy czajnik Wielki elektronowy spęd Kiedy foton j e s t ?

Rozdział czwarty: **Desperackie próby**

Kopenhaski kolaps Myślę, więc Śmieszna pomyłka von Neumanna Niepodzielna całość Rozmnażanie wszechświatów Wariacje na temat kwantowy Rozpaczliwe próby Relatywistyczne uwagi na marginesie Doświadczenie z czasem

Rozdział piąty: **Myślenie o myśleniu o rzeczach.**

Konstruowanie kwarków Einstein we właściwej perspektywie Opisywanie nieopisywalnego Jak uchwycić rzeczywistość Hurtownia kwantowej rzeczywistości

Epilog: **Rozwiązanie - mit naszych czasów.**

Bezwładność i masa Strunowa grawitacja Proste oblicze złożoności Uścisk dłoni z wszechświatem Czas na c z a s

Bibliografia.

Podziękowania

Napisanie tego rodzaju książki było możliwe dzięki dobrej woli licznych naukowców, którzy udostępnili mi kopie swoich publikacji, często przed ich ukazaniem się w druku. Wszystkie te źródła informacji są wymienione w tekście, lecz niektórym z moich korespondentów należy się szczególne podziękowanie ze względu na wpływ, jaki dyskusje i korespondencja z nimi wywarły na rozwój moich wyobrażeń o kwantowej rzeczywistości. Osoby te wymieniam w porządku alfabetycznym: Bruno Augenstein z korporacji RAND w Santa Monica, Shu-Yuan Chu z University of California w Riverside, John Cramer z University of Washington w Seattle, Paul Davies z University of Adelaide, Dipankar Home z Instytutu im. Bosego w Kalkucie, Geoff Jones z University of Sussex, Martin Krieger z University of Southern California w Los Angeles i Thanu Padmanabhan z Tata Institute w Bombaju.

University of Sussex zapewnił mi tym razem jeszcze większą pomoc niż przy moich poprzednich książkach, oferując mi tytuł Członka Kolegium Astronomicznego i umożliwiając dostęp do znakomitej biblioteki oraz Internetu, a astronomowie z Sussex zgodzili się, bym przetestował na nich niektóre z moich mniej konwencjonalnych pomysłów. Bez tych wszystkich ludzi książka ta nigdy by nie powstała.

Wstęp

Gdy pisałem opowieść o powstaniu teorii kwantowej, opublikowaną dziesięć lat temu, nie przyszło mi do głowy, że kiedykolwiek powrócę do kwantowych tajemnic w jeszcze jednej książce. Pisząc *W poszukiwaniu kota Schrödingera*, starałem się jedynie pokazać, jak dziwny i tajemniczy jest subatomowy świat kwantowej fizyki, której żelazna logika w połączeniu z dziwacznymi wynikami eksperymentów doprowadziła do sprzecznej ze zdrowym rozsądkiem teorii, potwierdzonej z kolei przez dalsze eksperymenty, co w rezultacie zmusiło fizyków do poważnego potraktowania tych dziwacznych koncepcji. W połowie lat osiemdziesiątych sytuacja wyglądała tak, że - mimo całej swojej tajemniczości - teoria kwantowa działa, i to właśnie dzięki niej rozumiemy zachowanie laserów, komputerowych układów elektronicznych, cząsteczek DNA i wielu innych rzeczy. Starsza teoria, czyli tak zwana klasyczna fizyka, nie była w stanie wyjaśnić tych zjawisk. W książce *W poszukiwaniu kota Schrödingera* wielokrotnie podkreślałem, iż ważne jest nie to, że teoria kwantowa jest trudna do zrozumienia, lecz to, że dobrze działa. Dzięki temu, że, jak powiedział Richard Feynman, „n i k t nie rozumie teorii kwantowej”, mogłem z czystym sumieniem zakończyć moją poprzednią książkę stwierdzeniem: „[...] jestem szczęśliwy, że mogę pozostawić czytelnika z nie dokończonymi wątkami, niepojętymi sugestiami i perspektywą dalszych opowieści, równie intrygujących jak historia kota Schrödingera”. Ale podczas gdy ja byłem szczęśliwy, że mogę pozostawić czytelnika z nie dokończonymi wątkami, fizycy nie spoczywali na laurach. Wielu z nich nie było szczęśliwych, mając teorię, której - mimo że dobrze działa - nie da się zrozumieć. Uporczywie próbowali więc rozwiązać kwantowe tajemnice. W trakcie tych poszukiwań niektóre z nich okazały się jeszcze bardziej tajemnicze, a zarazem ujawniły się kolejne dziwne aspekty teorii kwantowej. Na kimś, kto jest słabo zorientowany w temacie, niektóre wyjaśnienia kwantowych zagadek, które powstały w tym czasie, mogą robić wrażenie aktów rozpacz. W ciągu ostatnich kilku lat pojawiła się jednak koncepcja, która - po z górą sześćdziesięciu latach prób - może okazać się trafną intuicją i umożliwić zrozumienie natury rzeczywistości nie tylko nielicznym wtajemniczonym, ale każdemu zainteresowanemu.

To nowe zrozumienie nie opiera się wyłącznie na odpowiedniej interpretacji teorii kwantowej, ale także na wyjaśnieniu zachowania światła w ramach teorii względności. W niniejszej książce przedstawię stan zaawansowania obu teorii i pokażę, że najpełniejsze wyjaśnienie natury wszechświata i rozwiązanie wszystkich kwantowych tajemnic wymaga połączenia koncepcji kwantowych i relatywistycznych.

Czytelnik nie znajdzie tutaj zbyt wielu informacji o historycznym tle rozwoju teorii kwantowej, gdyż zostało to już omówione w poprzedniej książce. Zaczniemy od dojrzałej i sprawdzonej teorii. Pokażemy natomiast pewne nowe zagadki oraz nowe ujęcia starych zagadek, zanim dojdziemy do wyjaśnień. Mimo to czytelnik znajdzie tutaj wszystko, co jest konieczne do zrozumienia, o co chodzi w całej tej kwantowej debacie, niezależnie od tego, czy wcześniej przeczytał cokolwiek na ten temat (nie mam na myśli tylko moich książek). Dowie się o pozornie paradoksalnych

zjawiskach, takich jak fotony (cząstki światła), które mogą znajdować się równocześnie w dwóch miejscach, o atomach, które poruszają się równocześnie w dwie różne strony, o czasie, który stoi w miejscu dla cząstki poruszającej się z prędkością światła, oraz o całkiem realnej możliwości, że teoria kwantowa pozwoli kiedyś na skonstruowanie maszyny teleportującej rodem ze *Star Treka*¹.

Aby zarysować tło, zaczniemy od tego miejsca, do którego doszliśmy w książce *W poszukiwaniu kota Schrödingera*, ze sławnym kotem „we własnej osobie” i z dowodem Johna Bella, że jeśli dwa obiekty kwantowe kiedykolwiek były elementami jednego układu, to pozostają połączone i w jakiś sposób wzajemnie świadome swego istnienia, nawet jeżeli znajdują się bardzo daleko od siebie. Einstein nazywał to „widmowym oddziaływaniem na odległość”, a w bardziej formalnej terminologii stosowane jest określenie „nielokalność”. Pojęcia te mogą być ci, czytelniku, znane, lub też słyszysz o nich po raz pierwszy. W ciągu ostatnich dziesięciu lat „paradoks” kota Schrödingera, równocześnie żywego i martwego, wszedł do publicznego obiegu, ale nawet jeżeli sądzisz, że dobrze wiesz, o co w tym wszystkim chodzi, to przygotuj się do ponownego przemyślenia całej historii. Możesz się mocno zdziwić. Trzymam w zanadrzu większe i bardziej spektakularne paradoksy poparte niepodważalnymi testami eksperymentalnymi. Wszystko to, czym mam zamiar cię zaskoczyć, sprowadza się do jednego prostego pytania: W jaki sposób elektron potrafi przejść obiema drogami równocześnie przez układ eksperymentalny z dwiema szczelinami? W jaki sposób zna on c a ł y układ w jednym momencie?

Problem, który będziemy próbowali rozwiązać - niepojętą naturę kwantowego świata - najłatwiej zrozumieć, śledząc przygody tytułowych kotków, bliźniaczego potomstwa sławnego kota. Musimy zatem przypomnieć sobie wszystko, co wiemy o naturze światła - zjawiska, które jest kluczowym elementem zarówno mechaniki kwantowej, jak i teorii względności. Dopiero wtedy przejdziemy do nowych koncepcji, które próbują wyjaśnić naturę rzeczywistości i rozwiązać kwantowe tajemnice - wszystkie kwantowe tajemnice. Po raz pierwszy od pojawienia się w połowie lat dwudziestych teorii kwantowej można z jako taką pewnością stwierdzić, co naprawdę teoria ta z n a c z y . Czy można sobie wyobrazić lepszy powód do napisania tej książki?

kwiecień 1994
JOHN GRIBBIN

¹ *Star Trek* (w wolnym tłumaczeniu: Gwiezdne Wędrowki) - tytuł popularnego serialu o podróżach międzygwiazdnych, w którym maszyna teleportująca jest urządzeniem codziennego użytku (przyj. tłum).

Pięćdziesiąt lat rozmyślań nie przybliżyło mnie do odpowiedzi na pytanie: „Czym są kwanty światła?” Dzisiaj każdy Tom, Dick i Harry sądzi, że zna tę odpowiedź, ale wszyscy oni się mylą.

Albert Einstein List do M. Besso, 1951

Nie istnieje fizyczny świat poza jawnymi elementarnymi wrażeniami zmysłowymi poddanymi refleksji umysłu.

George Berkeley Treatise Concerning the Principles of Human Knowledge, 1710

Istnieje sześć tuzinów wersji plemiennej pieśni i każda z nich jest właściwa!

Rudyard Kipling In the Neolithic Age. 1895

Prolog

Problem

Podstawowa tajemnica teorii kwantowej zawiera się w eksperymencie z dwiema szczelinami. Tak oznajmił na pierwszej stronie trzeciego (poświęconego teorii kwantowej²) tomu³ słynnych *Feynmana wykładów z fizyki* jej autor, Richard Feynman, najwybitniejszy fizyk swojego pokolenia. Porównując fizykę kwantową z klasycznymi koncepcjami Isaaca Newtona i wielu pokoleń uczonych wychowanych na klasycznej fizyce, Feynman stwierdził, że zjawiska tego absolutnie „nie można wytłumaczyć w jakikolwiek klasyczny sposób” i że tkwi w nim „sama istota mechaniki kwantowej. W gruncie rzeczy zawiera ona j e d y n ą tajemnicę”. W innej książce, *The Character of the Physical Law*, Feynman napisał: „Okazuje się, że każdą inną sytuację w mechanice kwantowej można zawsze wytłumaczyć, mówiąc: «Pamiętasz eksperyment z dwiema szczelinami? To jest ten sam przypadek»”. Tak więc, idąc w ślady Feynmana, zaczniemy od eksperymentu z dwiema szczelinami, przedstawiając podstawową tajemnicę w jej pełnej krasie. Nawet jeżeli ten eksperyment jest komuś dobrze znany, to nie powinno to rodzić lekceważenia. Im więcej wiemy o doświadczeniu z dwiema szczelinami, tym bardziej wydaje się ono tajemnicze.

Jeżeli zetknąłeś się z nim po raz pierwszy w szkolnym laboratorium, to zapewne nie wydawało się wcale tajemnicze, a to dlatego, że nikt nie potrudził się (lub nie miał odwagi) wyjaśnić, na czym polega tajemnica. Prawie na pewno usłyszałeś, że zachowanie światła, przepuszczonego przez dwie wąskie szczeliny w przesłonie i tworzącego na ekranie układ jasnych i ciemnych prążków, w prosty i elegancki sposób dowodzi, że światło porusza się jak fala.

Wszystko to prawda, ale w żadnym razie nie jest to cała prawda.

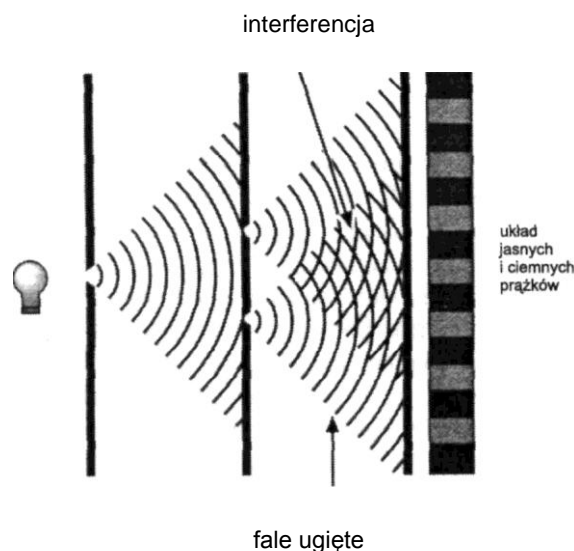
Fantastyczne światło

Klasycznym przykładem fali jest to, co widzimy na powierzchni jeziora, gdy wrzucimy do niego kamyk. Tworzy się seria zmarszczek w kształcie okręgów rozchodzących się od miejsca, gdzie

² Sformułowania „teoria kwantowa”, „fizyka kwantowa” i „mechanika kwantowa” będą w niniejszej książce traktowane jako równoważne. Pełne adresy bibliograficzne do książek cytowanych w tekście są zebrane w bibliografii na końcu książki.

³ W polskim tłumaczeniu stwierdzenie to pojawiło się na stronie 173 drugiej części pierwszego tomu (przyp. tłum.).

wpadł kamień. Jeżeli taka fala dotrze do przeszkody, w której znajdują się dwa otwory (każdy znacznie mniejszy niż długość fali), to po drugiej stronie bariery fale będą się rozprzestrzeniać w kształcie dwóch pół-okręgów, których środkami będą otwory w barierze. Powstanie obraz podobny do połowy tego, co uzyskalibyśmy, gdyby do jeziora wrzucić dwa kamyczki w tym samym momencie.



Ryc. 1. Jednorodna wiązka światła wychodząca z pierwszego otworu pada na drugi ekran. Fale biegnące z dwóch otworów w drugim ekranie poruszają się w fazie. Ich interferencja daje na ekranie charakterystyczny obraz jasnych i ciemnych prążków - wymowny dowód na to, że światło porusza się jak fala

Każdy wie, jak to wygląda. Wrzucmy do jeziora dwa kamyczki; w rzeczywistości nie zobaczymy dwóch układów kolistych zmarszczek nawzajem się przenikających, lecz bardziej skomplikowany wzór, wynikający z interferencji obu fal. W niektórych miejscach dwie zmarszczki dodają się, tworząc znacznie większą falę, w innych niwelują się nawzajem, pozostawiając nieznaczną falę lub zgoła zupełnie nic.

Gdy oświetlimy dwie szczeliny w przesłonie, a po drugiej stronie ustawimy ekran, to zaobserwujemy dokładnie takie samo zjawisko. Aby zobaczyć je możliwie najwyraźniej, dobrze jest użyć tylko jednego koloru światła, który odpowiada jednej określonej długości fali. Dwa układy fal rozchodzą się z obu otworów, podobnie jak zmarszczki na wodzie, i gdy padają na ekran, powstaje szereg jasnych i ciemnych pasm (prążków interferencyjnych) odpowiadających tym położeniom, w których fale się dodają (konstruktywna interferencja), oraz tym, w których się kasują (destruktywna interferencja). Prosta szkolna fizyka z której wynika nie tylko, że światło jest falą, ale także, iż można łatwo - mierząc odległości prążków - wyliczyć długość fali.

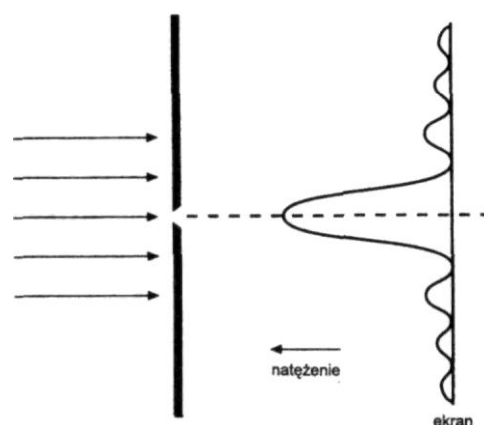
Jednak nawet na tym poziomie pojawiają się subtelności. Wzór na ekranie nie jest taki, jaki powstałby, gdyby przepuścić światło przez każdy z otworów z osobna, a następnie dodać oba powstałe wzory. Jest to jedna z kluczowych właściwości zjawiska interferencji. Gdy tylko jeden otwór jest otwarty, na ekranie utworzy się jasna plama na wprost otworu. Podobnie będzie z drugim otworem. Dodając je do siebie, uzyskalibyśmy podwójną plamę. Ale w przypadku interferencji - gdy światło przechodzi przez oba otwory równocześnie - powstający na ekranie wzór

jest bardziej skomplikowany, i to nie tylko dlatego, że najjaśniejszy punkt pojawia się w miejscu ekranu znajdującym się dokładnie w połowie między otworami, tam gdzie spodziewalibyśmy się raczej cienia niż światła.

Jak dotąd wszystko się zgadza. Światło j e s t falą. Niestety istnieją także bardzo poważne przesłanki wskazujące na to, że światło jest strumieniem cząstek, zwanych fotonami. A sposób przechodzenia cząstek przez dwa otwory w ścianie znacznie się różni, jak wiemy z codziennego doświadczenia, od sposobu przechodzenia fali.

Przypuśćmy, że rzeczywiście mamy do czynienia ze ścianą, w której zrobione są dwa otwory, i że mamy do dyspozycji duży stos kamieni. Rzucamy kamienie - jeden po drugim - w kierunku ściany, nie starając się celować w żadne określone miejsce. Niektóre kamienie trafią w jeden z otworów, niektóre w drugi i po drugiej stronie ściany utworzą się dwa stosy kamieni na wprost dwu otworów. Układ tych dwóch stosów będzie dokładnie taki sam, jaki powstałby, gdyby połowę rzutów kamieniami wykonano przy zasłoniętym jednym otworze, a resztę rzutów przy zasłoniętym drugim otworze. Z całą pewnością nie pojawi się stos kamieni ustawiony za środkiem odległości między dwoma otworami, dokładnie na wprost litej ściany. Cząstki biegnące pojedynczo przez dwa otwory nie interferują ze sobą.

Gdy przez otwory biegnie równocześnie wiele cząstek, to oczywiście łatwo wyobrazić sobie, że mogłyby one w jakiś sposób interferować, potracając się nawzajem, i w efekcie po drugiej stronie ściany powstałby nieco inny układ. W końcu wszyscy wiemy, że woda też jest zbudowana z cząstek - molekuł - a mimo to zmarszczki na jeziorze zachowują się jak fale. Przez analogię można by sobie wyobrazić, że strumień fotonów z lampy zachowuje się jak fala przy przechodzeniu przez dwa otwory. Jednak problem gmatwa się jeszcze bardziej, gdy spojrzymy, co się dzieje, gdy p o j e d y n c z e fotony - tylko jeden naraz - biegną przez układ eksperymentalny z dwoma otworami.

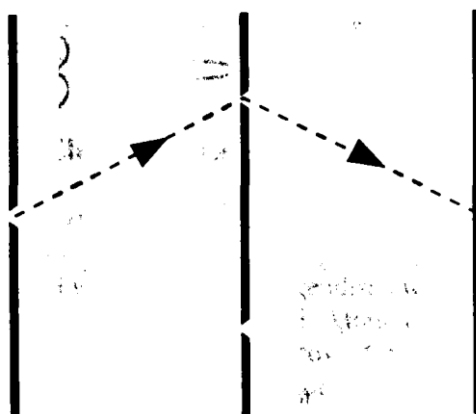


Ryc. 2. Wiązka elektronów przechodząca przez pojedynczy otwór daje rozkład, w którym większość elektronów znajduje się na prostej przechodzącej przez otwór. W taki sposób powinny zachowywać się cząstki

Należy podkreślić, że taki eksperyment rzeczywiście został wykonany w połowie lat osiemdziesiątych w Paryżu. Zaobserwowano pojedyncze fotony biegnące przez układ eksperymentalny z dwoma otworami i interferujące same z sobą. Gdy pisałem *W poszukiwaniu*

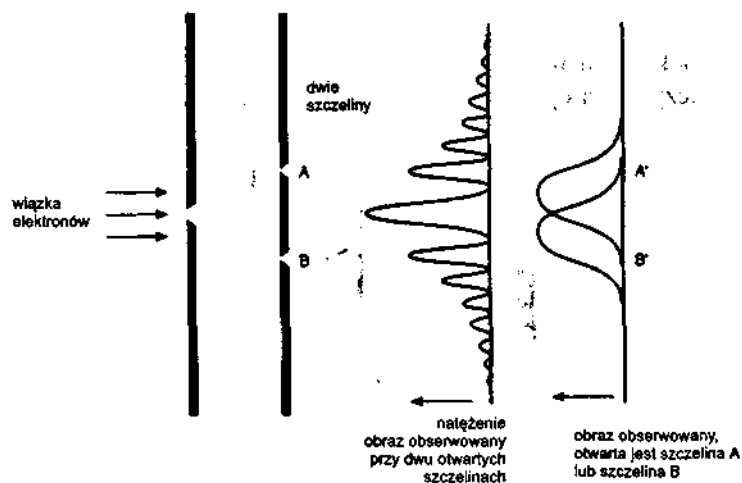
kota Schrödingera, istniały wyraźne przesłanki wskazujące, jak światło zachowuje się w takich okolicznościach, lecz były one w gruncie rzeczy poszlakowe. Teraz wiemy już dokładnie, co się dzieje, gdy pojedynczy foton biegnie przez taki układ eksperymentalny.

To, co rzeczywiście widzimy, to oczywiście tylko obraz, który powstaje na ekranie, gdy pada na niego światło przechodzące przez dwa otwory. Wyobraźmy sobie, że osłabiliśmy źródło światła tak, że emituje ono fotony pojedynczo, czyli że w każdej chwili tylko jeden foton znajduje się w obszarze pomiędzy źródłem a ekranem (fizycy potrafią tego dokonać, aczkolwiek wymaga to sporych umiejętności i skomplikowanej aparatury). Teraz wyobraźmy sobie, że w charakterze ekranu - po drugiej stronie przesłony z otworami - znajduje się płyta fotograficzna, która w postaci białej kropki rejestruje każdy padający na nią foton. W trakcie eksperymentu, gdy fotony przechodzą przez układ, w każdym wypadku widzimy to, czego się spodziewaliśmy - pojedynczy foton opuszcza źródło, a następnie tworzy białą kropkę na płycie fotograficznej. Ale w miarę jak przez układ przechodzą najpierw setki, potem tysiące, a w końcu miliony fotonów, powstaje fantastyczny widok. Pojedyncze białe kropki na płycie fotograficznej grupują się w białe prążki, przedzielone ciemnymi prążkami - dokładnie tak, jak w typowym obrazie interferencyjnym.



Ryc. 3. Elektron lub foton przechodzący przez jeden z dwóch otworów powinien zachowywać się tak, jakby przechodził przez pojedynczy otwór, jeżeli kierować się zdrowym rozsądkiem. Zgodnie ze zdroworozsądkowymi regułami obecność drugiego otworu nie powinna mieć znaczenia

Pomimo że każdy foton startuje jako cząstka i trafia w ekran jako cząstka, wydaje się, że przechodzi równocześnie przez oba otwory, interferuje z samym sobą i decyduje, w którym miejscu ekranu zdeponować swój maleńki wkład w ogólny obraz interferencyjny. Takie zachowanie stwarza dwie zagadki. Po pierwsze, w jaki sposób pojedynczy foton przechodzi równocześnie przez oba otwory? Po drugie, nawet jeśli w jakiś sposób potrafi tego dokonać, skąd „wie”, w który punkt ekranu ma trafić? Dlaczego każdy foton nie porusza się wzdłuż tej samej trajektorii i nie trafia w to samo miejsce na płycie fotograficznej?



Ryc. 4. Zarówno elektrony, jak i fotony zachowują się jednak tak, jakby wiedziały o obecności drugiego otworu. Gdy oba otwory są otwarte, obraz na ekranie nie jest taki, jaki otrzymalibyśmy, otwierając każdy otwór z osobna i następnie sumując powstałe w ten sposób obrazy. Czy oznacza to, że elektrony są w istocie falami?

Wydaje się to mocno tajemnicze, lecz zawsze możemy wysunąć argument, że samo światło jest zjawiskiem dosyć dziwnym. I rzeczywiście, światło (ściślej rzecz ujmując - promieniowanie elektromagnetyczne) porusza się zawsze z tą samą prędkością, zwaną prędkością światła i oznaczaną literą c . Niezależnie od tego, jak szybko się poruszamy i jak szybko porusza się źródło światła, gdy mierzymy prędkość światła, zawsze uzyskujemy ten sam wynik. Ma to głębokie konsekwencje, jak się przekonamy podczas omawiania teorii względności. Z pewnością nie przypomina to zachowania obiektów z codziennego świata. Na dodatek fotony mają jeszcze jedną dziwną i sprzeczną ze zdrowym rozsądkiem właściwość - nie mają masy. Czy to możliwe że dziwaczne zachowanie fotonów w układzie z dwoma otworami wiąże się z faktem, że są one nieważkie i poruszają się z prędkością światła? Czy może jest to tylko jeszcze jedna dziwna właściwość światła? Jak ujął to Ralph Baierlein, „światło podróżuje jako fala, lecz przybywa jako cząstka”⁴. Może to jest właśnie tą szczególną właściwością światła?

Niestety tak nie jest. Możemy wykonać ten sam eksperyment na elektronach, które - mimo że raczej nie należą do obiektów, z którymi mamy do czynienia w życiu codziennym - nie tylko są obdarzone masą, ale także i ładunkiem elektrycznym, a na dodatek poruszają się z różnymi prędkościami, zależnie od okoliczności. Mimo to elektrony także podróżują jako fale, ale zaczynają i kończą podróż jako cząstki. Fakt ten znacznie trudniej jest zakwalifikować jako „szczególną właściwość” elektronów.

Elektronowa interferencja

Elektrony należą oczywiście do tajemniczego świata cząstek. Po raz pierwszy zostały doń zakwalifikowane w 1897 roku przez J.J. Thomsona, który pracował w Laboratorium Cavendisha w Cambridge. Thomson pokazał, że elektrony są cząstkami, które odrywają się lub są odrywane od

⁴ R. Baierlein, *Newton to Einstein*, s. 170.

atomów. Był to pierwszy dowód na to, że atom nie jest niepodzielny. Każdy elektron ma dokładnie taką samą masę (nieco więcej niż 9×10^{-31} kg - co oznacza „zero, przecinek, trzydzieści zer, dziewiątka” kilogramów), taki sam ładunek ($1,6 \times 10^{-19}$ kulomba) i porusza się szybciej lub wolniej, w zależności od oddziałujących na niego sił. Można nim manipulować za pomocą pól elektrycznych i magnetycznych. Pod wieloma względami elektrony zachowują się jak maleńkie, naładowane elektrycznie kulki.

Mimo to już pod koniec lat dwudziestych, trzydzieści lat po odkryciu elektronu, stało się jasne, że zachowuje się on także jak fala. Jednym z tych, którzy to udowodnili, był George Thomson, syn J.J. Thomsona. Dowody na podwójną naturę elektronów, tak zwany dualizm falowo-korpuskularny, były dobrze znane o wiele wcześniej, ale dopiero w 1927 roku japoński zespół fizyków przeprowadził na elektronach pierwsze doświadczenie z dwoma otworami.

Wcześniej zarówno podręczniki (łącznie z *Wykładami* Feynmana), jak i książki popularnonaukowe (łącznie z moimi) określały takie doświadczenia mianem „eksperymentów myślowych” i zapewniały czytelników, że na podstawie dostępnej nam wiedzy o elektronach można przewidzieć, jak zachowują się one w obliczu dwóch małych otworów w przesłonie. Upłynęło aż 90 lat od odkrycia elektronów jako cząstek i 60 lat od odkrycia ich falowej natury, gdy zespół z laboratorium badawczego firmy Hitachi oraz z tokijskiego Gakushuin University rzeczywiście wykonał na elektronach eksperyment z dwiema szczelinami.

W doświadczeniu tym w roli „podwójnej szczeliny” wystąpił przyrząd zwany bipryzmatem elektronowym, natomiast ekran, na który elektrony trafiały po przejściu przez szczeliny, był w gruncie rzeczy ekranem telewizyjnym. Każdy padający na ekran elektron tworzył małą jasną plamkę (podobnie jak w konwencjonalnym telewizorze). W miarę jak kolejne elektrony docierały do ekranu, powstawał na nim obraz interferencyjny.

Wyniki tego eksperymentu były dokładnie takie same jak dla równoważnego eksperymentu z fotonami. Źródłem elektronów było ostrze mikroskopu elektronowego, standardowego i dobrze znanego przyrządu. Każdy elektron opuszczał końcówkę tego „elektronowego działa” jako cząstka i docierał do ekranu jako cząstka, tworząc na ekranie jasną plamkę światła. Jednak obraz końcowy na ekranie był obrazem interferencyjnym, co oznacza, że elektrony poruszały się przez układ eksperymentalny jako fale.

Możemy oczywiście nadal próbować jakoś wytłumaczyć to dziwne zachowanie. Nikt przecież nigdy nie widział pojedynczego elektronu ani też nikomu nie udało się złapać go w dłoń. Jedyne, co widać, to ślady, które powstają, gdy elektrony padają na dostatecznie czuły ekran. Wiemy wszyscy z codziennego doświadczenia, że te dziwaczne efekty interferencyjne nie pojawiają się, gdy rzucamy kamieniami przez otwory. Ani kamienie, ani piłki tenisowe, ani żadne inne zwykłe przedmioty nie przejawiają tego dziwnego falowo-korpuskularnego dualizmu.

Jednak i na to fizycy mają odpowiedź. Jeśli ktoś życzy sobie dowodu, że obiekty na tyle duże, iż można je zobaczyć, także zachowują się jak fale przy przejściu przez dwa otwory, to dowód taki istnieje.

Te obiekty to atomy. Trzeba oczywiście przyznać, że pojedynczego atomu nie da się zobaczyć gołym okiem ani trzymać go na dłoni. Da się go jednak sfotografować po uprzednim złapaniu go w magnetyczną pułapkę. To osiągnięcie (opisane na przykład przez Hansa von Baeyera książce *Taming the Atom* [Opanować atom]) jest tym bardziej godne podziwu, że samo pojęcie atomu zostało w pełni zaakceptowane przez naukę dopiero na początku dwudziestego wieku. Albert Einstein uzyskał doktorat na podstawie pracy, w której między innymi wykazał, że atomy rzeczywiście istnieją. Pomimo że atomy są znacznie większe od elektronów, wedle naszych codziennych kryteriów są one wciąż niezwykle małe. Atom węgla ma masę nieco mniejszą niż 2×10^{-26} kg, 22 miliony razy większą niż elektron. Rozmiar atomu wynosi około jednej dziesięciomilionowej milimetra, co oznacza, że na długości równej jednemu ząbkowi znaczka pocztowego zmieściłoby się 10 milionów atomów. Mimo to da się sfotografować pojedynczy atom, a jego obraz można oglądać „na żywo” na ekranie telewizora.

Doświadczenie z dwoma otworami przy użyciu atomów zostało po raz pierwszy wykonane na początku lat dziewięćdziesiątych przez zespół fizyków z uniwersytetu w Konstancji. Użyli oni atomów helu, które przechodziły przez szerokie na jeden mikrometr (jedna milionowa część metra) szczeliny w złotej folii i padały na umieszczony po drugiej stronie detektor. Tym razem nie dało się obserwować powstawania obrazu interferencyjnego bezpośrednio na ekranie telewizyjnym, lecz pomiary liczby atomów helu docierających do różnych obszarów grającego rolę ekranu detektora potwierdziły, że także i w tym przypadku obraz ten powstaje. Atomy również podróżują jako fale, ale docierają do celu jako cząstki.

Na początku lat dziewięćdziesiątych podobne wyniki ogłosiło kilka innych grup badawczych. W jednej z tych prac, na MIT [Massachusetts Institute of Technology], użyto atomów sodu. W każdym wypadku wyniki są takie same. Pojedynczy atom przechodzi równocześnie przez oba otwory i następnie interferuje sam z sobą. Wygląda na to, że atom może być w dwóch różnych miejscach (w dwóch otworach) w jednej chwili.

Jednym z końcowych (jak dotąd) wątków tego tematu był eksperyment wykonany w National Institute of Standards and Technology [Narodowy Instytut Standardów i Technologii] w miejscowości Boulder w stanie Colorado w USA oraz w University of Texas. Doświadczenie z dwoma otworami zostało tutaj odwrócone. Zamiast wysyłać atomy przez układ z dwoma otworami, eksperymentatorzy uwięzili pary atomów w polu magnetycznym i użyli ich jako „otworów”, odbijając od nich światło i badając powstający w efekcie obraz interferencyjny. Fale powstające w wyniku odbicia od atomów rozchodzą się w zasadzie w taki sam sposób jak fale przechodzące przez dwa otwory w przesłonie. Doświadczenie działa oczywiście dzięki temu, że atomy są cząstkami dającymi się uwięzić w polu magnetycznym i mogącymi rozproszyć światło. Trudno o ładniejszy przykład dualizmu falowo-korpuskularnego niż to połączenie eksperymentów interferencyjnych, w których występują atomy - cząstki na tyle duże, że można je sfotografować.

Te dziwne efekty nie pojawiają się, gdy mamy do czynienia z kamieniami, piłkami tenisowymi czy z czymkolwiek innym, co można dotknąć i zobaczyć gołym okiem. Musi więc istnieć jakiś próg,

po przekroczeniu którego reguły kwantowego świata przestają obowiązywać. Gdzieś pomiędzy rozmiarami atomu a rozmiarami istoty ludzkiej wyłączają się reguły kwantowe i zaczynają działać reguły fizyki klasycznej. Tym, gdzie leży ten próg i dlaczego zachodzi taka zmiana, zajmiemy się w dalszej części książki. Odpowiedzi okażą się kluczowe dla naszej koncepcji rzeczywistości.

Na razie podkreślmy raz jeszcze, że wszystkie te doświadczenia zostały rzeczywiście przeprowadzone. Dla fizyków ich wyniki nie stanowiły zaskoczenia. Po 1930 roku każdy dostatecznie kompetentny fizyk potrafiłby je przewidzieć, posługując się regułami mechaniki kwantowej. Wyniki mogłyby być inne, gdyż teoria kwantowa mogłaby być błędna, lecz okazało się, że na najgłębszym poziomie, w samym sercu największej tajemnicy, gdy na przełomie lat osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych kluczowe eksperymenty zostały w końcu przeprowadzone, „odpowiedzi” okazały się dokładnie takie, jakie przewiduje teoria kwantowa. W jaki więc sposób fizyka tłumaczy to dziwne zachowanie fotonów, elektronów i atomów?

Standardowy punkt widzenia

Standardowa interpretacja zjawisk kwantowego świata jest znana pod nazwą interpretacji kopenhaskiej, ponieważ została ona w dużej części opracowana przez duńskiego fizyka, Nielsa Bohra, który „pracował w Kopenhadze. Wielu innych ludzi, w szczególności niemieccy uczeni Werner Heisenberg i Max Born, przyczyniło się w znaczący sposób do powstania pojęć, które stały się elementami interpretacji kopenhaskiej, ale Bohr był zawsze jej najbardziej zaangażowanym zwolennikiem. Interpretacja ta powstała w ostatecznej postaci pod koniec lat dwudziestych, czyli zaledwie kilkadziesiąt lat temu. Od tego czasu stanowiła podstawę wszystkich prac związanych z fizyką kwantową i była wykładana adeptom fizyki na uniwersytetach i innych szkołach wyższych, mimo że opiera się ona na pewnych całkiem dziwacznych koncepcjach.

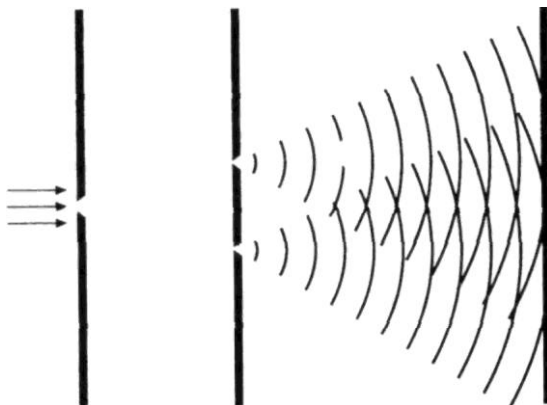
Zasadniczym jej elementem jest tak zwany kolaps funkcji falowej. Próbując wyjaśnić, w jaki sposób obiekt taki jak elektron może „podróżować jako fala, ale zakończyć podróż jako cząstka”, Bohr i jego koledzy stwierdzili, że to akt obserwacji tej fali jest przyczyną jej redukcji, czyli „kolapsu”, w wyniku czego fala staje się cząstką. Widzimy, jak koncepcja ta działa, w elektronowej wersji eksperymentu z dwoma otworami - elektron przechodzi przez otwory jako fala, a następnie „redukuje” się do pojedynczego punktu na ekranie detektora.

To jednak tylko jeden aspekt tej historii. W jaki sposób fala reprezentująca pojedynczy elektron interferuje sama z sobą i w jaki sposób wybiera punkt na ekranie, w którym się „redukuje”? Zgodnie z interpretacją kopenhaską, tym, co przechodzi przez układ dwóch szczelin, nie jest żadna materialna fala, lecz fala prawdopodobieństwa. Równanie opisujące ruch fali kwantowej, odkryte przez Austriaka, Erwina Schrödingera, nie dotyczy fali materialnej, podobnej do zmarszczek na wodzie. Opisuje ono prawdopodobieństwo znalezienia fotonu (lub elektronu, lub jakiejś innej kwantowej cząstki) w określonym miejscu.

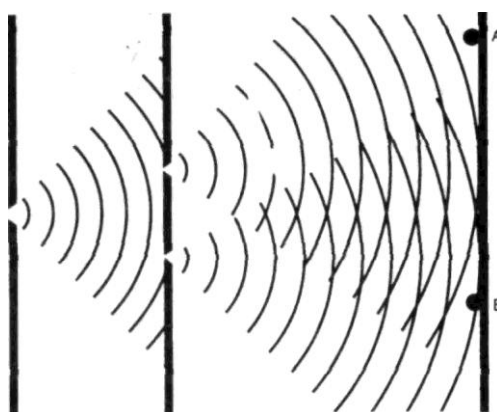
Zgodnie z tym ujęciem, w znacznej mierze opartym na pracach Borna, elektron, który nie jest w danej chwili obserwowany, nie istnieje (literalnie) jako cząstka. Istnieje pewne prawdopodobieństwo, że znajduje się on tu lub tam, lecz w zasadzie może pojawić się dosłownie

gdziekolwiek we wszechświecie. Niektóre położenia są bardzo prawdopodobne (jasne prążki w eksperymencie z dwoma otworami), inne bardzo nieprawdopodobne (ciemne prążki), ale w zasadzie jest m o ż l i w e , aczkolwiek niezwykle mało prawdopodobne, że elektron w ogóle nie wyląduje w żadnym punkcie obrazu interferencyjnego, natomiast może pojawić się na Marsie lub na ekranie telewizora sąsiada z innej ulicy.

Jednakże z chwilą, gdy elektron zostanie zaobserwowany, szanse ulegają zmianie. Funkcja falowa redukuje się (być może na Marsie, jeśli akurat ktoś ją tam obserwuje, albo, co bardziej prawdopodobne, obszarze obrazu interferencyjnego) i w tym momencie wiadomo ze procentową pewnością, gdzie elektron się znajduje.



Ryc. 5. Standardowe wytłumaczenie zagadki z ryciny 4 opiera się na „falach prawdopodobieństwa”, które przechodzą przez obie szczeliny i decydują, gdzie ląduje każda cząstka z wiązki. Fale prawdopodobieństwa interferują dokładnie tak samo jak fale na wodzie



Ryc. 6. Gdy jednak s z u k a m y cząstek, znajdujemy cząstki (w tym wypadku A i B)! Fale prawdopodobieństwa decydują o tym, gdzie są cząstki, lecz nigdy nie widzimy samych fal. W rzeczywistości nie wiemy, co przebiega przez układ doświadczalny. To dziwne zachowanie dało asumpt do stwierdzenia, że elektron (lub foton) „podróżuje jako fala, lecz przybywa jako cząstka”

Jednak gdy tylko przerwiemy obserwację, prawdopodobieństwo zaczyna z tego miejsca „wyciekać”. Prawdopodobieństwo znalezienia elektronu w tym samym położeniu, w którym ostatnio go widziano, zaczyna maleć, a rośnie prawdopodobieństwo znalezienia go gdzie indziej, w miarę jak fala prawdopodobieństwa rozplywa się we wszechświecie.

Chociaż robi wrażenie nieco dziwacznej, interpretacja ta jest bardzo przydatna w praktyce, ponieważ w większości zastosowań, takich jak telewizory i elektroniczne układy komputerowe, mamy do czynienia z olbrzymimi liczbami elektronów. Jeżeli wszystkie one ściśle stosują się do reguł prawdopodobieństwa i statystyki, to oznacza to, że zachowanie dużej liczby elektronów jest przewidywalne. Jeśli wiemy, że 30% elektronów podąży jedną drogą przez układ elektroniczny, a 70% - drugą, to nie musimy się zastanawiać nad tym, którą drogą przemieszcza się pojedynczy elektron. Na tej samej zasadzie właściciel kasyna wie, że reguły prawdopodobieństwa przyniosą mu zysk w dostatecznie długim okresie, nawet jeśli od czasu do czasu któremuś z graczy trafi się wielka wygrana. Koncepcja ta tak zdegustowała Alberta Einsteina, że wypowiedział swą słynną sentencję: „Nie wierzę, że Bóg gra w kości ze wszechświatem”, a konsekwencje tej koncepcji stają się oczywiste, gdy w grę wchodzi eksperymenty z pojedynczymi elektronami lub pojedynczymi fotonami.

Jeden z tajemniczych aspektów tej interpretacji staje się szczególnie widoczny, gdy rozważy się pewien wariant eksperymentu z dwoma otworami. Wprawdzie nie został on jeszcze zrealizowany w wersji z pojedynczymi elektronami, ale nieco bardziej skomplikowane doświadczenia w istocie potwierdzają sposób zachowania elektronów i nie ma wątpliwości, że właśnie tak by było, gdyby ktoś zdołał zrealizować ten eksperyment w jego czystej formie.

Po pierwsze, pamiętamy, co się dzieje z obrazem interferencyjnym (wytworzonym zarówno przez elektrony, jak i przez fotony), gdy jeden z otworów zostanie zamknięty. Obraz znika. Jest oczywiste, że gdy tylko jeden otwór jest otwarty, to elektrony muszą przejść przez ten jeden jedyny otwór, aby dostać się do ekranu detektora. Jeżeli jednak wyobrażamy sobie elektrony jako cząstki, to sprawa jest dosyć dziwna. Skąd elektron „wie”, czy ten drugi otwór jest otwarty, czy nie? Prosta cząstka, podróżująca przez pojedynczy otwór układu, nie może wiedzieć, czy drugi otwór jest otwarty, czy nie, i w gruncie rzeczy nic jej to nie obchodzi. Nawet jeżeli ustawi się eksperyment w taki sposób, że drugi otwór jest zamknięty (lub otwarty) w chwili, gdy elektron opuszcza „działo”, a następnie zostaje otwarty (lub zamknięty), zanim elektron dotrze do pierwszego otworu, to elektron „wybierze” sposób zachowania właściwy dla sytuacji i pobiegnie taką drogą, aby pozostawić odpowiedni ślad na ekranie detektora. Możemy nawet tak ustawić eksperyment, aby drugi otwór otwierał się i zamykał losowo. Wtedy trajektoria, którą wybierze każdy elektron (przy jednym otworze), będzie zależeć od tego, czy drugi otwór jest otwarty w t y m s a m y m m o m e n c i e .

Wygląda na to, że elektrony wiedzą o większym fragmencie świata niż ich bezpośrednie otoczenie. Znają warunki nie tylko w okolicy samego otworu, ale w całym obszarze eksperymentu. Ta nielokalność jest podstawową właściwością mechaniki kwantowej i to ona tak głęboko niepokoiła Einsteina. Właśnie to było przyczyną jego uwag o „widmowym oddziaływaniu na odległość”, aczkolwiek miał wtedy na myśli jeszcze bardziej zadziwiający przejaw nielokalności. Niebawem wrócimy do tego tematu.

Jak dotąd, wszystkie wnioski wynikają z obserwacji obrazów na ekranie detektora, które powstają przy różnych kombinacjach otwartych i zamkniętych otworów. Przyjrzyjmy się teraz, co się dzieje w samych otworach. Wyobraźmy sobie dwa detektory ustawione przy obu otworach w eksperymencie z pojedynczo biegnącymi elektronami. Możemy teraz sprawdzić, czy elektron biegnie przez oba otwory równocześnie jako fala, czy tylko przez jeden otwór (czy może połówka elektronu przechodzi przez każdy z dwóch otworów), zerkając równocześnie na ekran, aby się przekonać, jaki obraz powstanie, gdy padnie nań dostatecznie duża liczba elektronów. Okazuje się, że w takiej sytuacji każdy elektron zachowuje się jak mała kulka i zawsze biegnie przez jeden otwór. Ale obraz interferencyjny, znika. Zamiast niego pojawia się taki obraz, jaki dawałyby małe kulki biegnące niezależnie przez każdy z dwóch otworów (lub kamienie rzucone w ścianę z dwoma otworami). Fakt obserwowania fali elektronu powoduje, że redukuje się ona i zachowuje jak cząstka w kluczowym momencie przechodzenia przez przesłonę. Nie oznacza to bynajmniej, że rozwiązaliśmy zagadkę nielokalności. Aby zmienić obraz na ekranie, wystarczy obserwować tylko jeden otwór. Widzimy wtedy elektrony biegnące jako cząstki, a na ekranie pojawia się taki obraz, jaki dają kulki. W jakiś sposób elektrony biegnące przez drugi otwór „wiedzą”, że obserwujemy pierwszy otwór i w rezultacie zachowują się jak cząstki. Statystyczny aspekt interpretacji kopenhaskiej wciąż występuje każdej z powyższych sytuacji. Jeżeli eksperyment został ustawiony idealnie symetrycznie, to dokładnie połowa elektronów pobiegnie każda z dwóch dróg: 50% wybierze jeden otwór, 50% drugi, chociaż nie ma żadnego sposobu, aby przewidzieć, jaką drogę wybierze pojedynczy elektron i w którym miejscu na ekranie zostawi swoją plamkę. Gdy rzucamy wielokrotnie monetą, może się zdarzyć, że kilka razy z rzędu wypadnie orzeł. Na tej samej zasadzie kilka kolejnych elektronów może wybrać ten sam otwór, ale po przejściu miliona elektronów okaże się, że pół miliona utworzyło plamkę na wprost jednego otworu i pół miliona na wprost drugiego (nadal je obserwujemy). Fala prawdopodobieństwa nadal działa, nawet gdy elektrony są obserwowane i zachowują się jak cząstki.

Bohr uważał, że istotne jest nie zachowanie pojedynczego ani nawet miliona elektronów, lecz cały układ eksperymentu, łącznie z elektronami, otworami, ekranem, detektorem i *z y w y m o b s e r w a t o r e m*. Nie da się powiedzieć, że elektron *j e s t* cząstką lub że *j e s t* falą. Wszystko, co możemy zobaczyć, to rezultaty pomiarów w określonej sytuacji doświadczalnej. Jeśli ustawimy eksperyment pod kątem pomiaru fal, to zobaczymy obraz interferencyjny. Jeśli zechcemy obserwować cząstki przechodzące przez otwory, to zobaczymy cząstki. Możemy nawet zaczekać do momentu, aż elektron opuści „działo”, i dopiero wtedy zdecydować, czy chcemy włączyć detektory ustawione przy otworach, żeby obserwować cząstki. W każdym wypadku końcowy efekt (czyli obraz na ekranie) zależy od całego układu eksperymentalnego. Ten holistyczny aspekt kwantowego świata ma bardzo głębokie implikacje filozoficzne.

Głębokie wody

Interpretacja kopenhaska królowała przez ponad pięćdziesiąt lat, od 1930 roku po lata osiemdziesiąte, nie kwestionowana przez zdecydowaną większość fizyków. Nie interesowały ich

głębokie filozoficzne Konsekwencje i zagadki związane z tą interpretacją, gdyż wystarczającym argumentem była możliwość stosowania mechaniki kwantowej w praktyce. Jednak w ostatnich latach wyraźnie wzrosło zainteresowanie zagadnieniem znaczenia teorii kwantowej i podejmuje się coraz więcej wysiłków mających na celu znalezienie alternatywnych interpretacji.

Główny problem polega na zrozumieniu tej sztuczki z kolapsem (redukcją) funkcji falowej. Bohr bardzo ładnie tłumaczy, że trzeba uwzględnić cały układ eksperymentalny, żeby się przekonać, w jaki sposób fala elektronowa się zredukuje. Nie ma jednak czegoś takiego jak czysty, wyizolowany eksperyment. Interpretacja ta mówi nam, że obiekty takie jak elektron są realne tylko wtedy, gdy są obserwowane, czyli że aparatura pomiarowa jest w jakimś sensie „bardziej realna” niż fotony, elektrony i cała reszta cząstek. To nie jest moja interpretacja interpretacji kopenhaskiej. Tak dosłownie stwierdzili Bohr, Heisenberg i ich koledzy. Heisenberg powiedział na przykład: „Interpretacja kopenhaska stwierdza, że podstawą każdej fizycznej interpretacji są obiekty i procesy opisywalne w kategoriach klasycznych”⁵. Innymi słowy, mimo że wszystkie obiekty realnego (klasycznego) świata składają się z atomów, atomy są w jakiś sposób mniej realne niż te obiekty! Dla wielu ludzi brzmiało to wyjątkowo kuriozalnie, nawet w latach trzydziestych, a obecnie, gdy można atomy fotografować, staje się jeszcze trudniejsze do przyjęcia.

Jeśli zastosuje się interpretację kopenhaską do eksperymentu z dwoma otworami, to ktoś musi obserwować układ, aby znalazł się on w określonym stanie. Heinz Pagels, w owym czasie (1981) prezes Nowojorskiej Akademii Nauk, a więc z pewnością osoba kompetentna, określił to następująco: „Nie można uznać obiektywnego istnienia elektronu w określonym punkcie przestrzeni, na przykład w jednej z dwóch szczelin, niezależnie od obserwacji. Wydaje się, że elektron pojawia się jako obiektywny obiekt dopiero wtedy, gdy go obserwujemy”⁶. Ale eksperymentator jest także częścią zewnętrznego świata, a nie tylko elementem układu doświadczalnego. Ludzie składają się między innymi z elektronów. Co powoduje, że ich funkcje falowe ulegają redukcji i zachowują się jak dobrze zlokalizowane obiekty w obszarze ciała eksperymentatora? Zapewne oddziaływania z otoczeniem, z zewnętrznym światem. A co powoduje, że zewnętrzny świat staje się w tym sensie „realny”? Więcej oddziaływań, z większą liczbą obiektów (i obserwatorów) zewnętrznego świata, w coraz większej skali. Jeżeli potraktujemy interpretację kopenhaską dosłownie, to okaże się że fala elektronu redukuje się do punktu na ekranie detektora, ponieważ cały wszechświat ją obserwuje. Jest to dostatecznie dziwaczne samo w sobie, lecz niektórzy kosmolodzy (między innymi Stephen Hawking) obawiają się, że oznacza to także, iż musi istnieć coś „poza wszechświatem”, co obserwuje wszechświat jako całość i powoduje redukcję funkcji falowej wszechświata⁷. John Wheeler z kolei uważa, że obecność świadomych obserwatorów, czyli nas, spowodowała kolaps funkcji falowej i w konsekwencji

⁵ Cytowane przez Nicka Herberta w: P. Davies (red.), *The New Physics* [Nowa fizyka], Cambridge University Press, 1989, s. 143.

⁶ H. Pagels, *The Cosmic Code*, s. 144.

⁷ Por. np. S. Hawking, *Krótką historia czasu* lub J. Gribbin, *In Search of the Big Bang*.

istnienie wszechświata. Zgodnie z tym poglądem wszystko we wszechświecie istnieje dlatego, że my obserwujemy świat. Tego rodzaju desperackie próby ratowania sytuacji omówimy dokładniej nieco później, ale sam fakt, że są one wysuwane przez poważnych naukowców, wskazuje, że sprawa rzeczywiście jest trudna.

Jeszcze inny problem dotyczy związku między cząstkowym i falowym aspektem zachowania obiektów kwantowych. Bohr sformułował określenie „właściwości komplementarne” w takim sensie, w jakim orzeł i reszka są komplementarnymi stronami monety. Jeżeli położymy monetę na stole, to na wierzchu będzie albo orzeł, albo reszka, ale nie obie strony równocześnie. Zgodnie z interpretacją kopenhaską obiekt taki jak elektron nie jest ani falą, ani cząstką, lecz czymś zasadniczo odmiennym, czego nie potrafimy opisać za pomocą terminów codziennego języka. Obiekt ten może pokazać nam swoją stronę falową albo cząstkową w zależności od tego, jaki eksperyment zdecydujemy się wykonać - czyli którą stronę położymy monetę na stole - ale może mieć także inne właściwości, których nie potrafimy zmierzyć lub o których nic nie wiemy.

Komplementarność lub dualizm cząstkowo-falowy wiąże się ze słynną zasadą nieoznaczoności odkrytą przez Heisenberga. Najprostsza wersja tej zasady mówi, że nie jest możliwy równoczesny pomiar pędu i położenia obiektu kwantowego. Pęd jest po prostu miarą tego, jak szybko dany obiekt się porusza i w jakim kierunku. Jest to w gruncie rzeczy właściwość falowa - fala musi się poruszać w którąś stronę, gdyż inaczej nie byłaby falą. Położenie to własność zdecydowanie cząstkowa, gdyż fala jest z natury rzeczy rozproszona w przestrzeni, a cząstka zlokalizowana w jednym miejscu. Możemy wykonać eksperyment, który zmierzy położenie elektronu, lub możemy badać kierunek, w którym on się porusza. W każdym wypadku możemy uzyskać dowolnie dokładny pomiar. Jednak dokładny pomiar położenia zaburza pęd i pogarsza w określonym stopniu dokładność pomiaru pędu, i *vice versa*.

Nie wynika to z praktycznych trudności związanych z wykonaniem pomiarów, jak wciąż mylnie sugerują niektóre podręczniki. Przyczyna nie leży w tym, że mierząc położenie elektronu (na przykład przez odbijanie od niego fotonów), potrącamy go i tym samym zmieniamy jego pęd. Obiekt kwantowy n i e ma dokładnie określonego pędu i dokładnie określonego położenia. Sam elektron nie „wie”, w pewnych granicach, gdzie się znajduje i dokąd podąża. Tylko lekką przesadą byłoby stwierdzenie, że gdyby elektron znał dokładnie swoje położenie, to zupełnie nie znałby kierunku i prędkości swojego ruchu, a gdyby wiedział dokładnie, dokąd zmierza i jak szybko, to nie miałby pojęcia, gdzie się znajduje. Zazwyczaj jednak obiekty kwantowe mają przybliżone pojęcie zarówno o jednym, jak i o drugim. Słowo „przybliżone” jest w tym kontekście istotne. Jakkolwiek dosyć trudno to pogodzić ze zdroworozsądkowym podejściem, wynikającym z obserwacji naszego codziennego świata, obiektowi kwantowemu nie da się jednoznacznie przypisać określonego położenia i zawsze istnieje jakaś niepewność co do kierunku i prędkości jego ruchu.

Właściwość ta jest kluczem do reakcji fuzji jądrowej, gdyż kwantowa nieokreśloność pozwala oddalonym na pewną odległość atomom na - mówiąc językiem fizyki klasycznej - zetknięcie się,

częściowe nałożenie i połączenie. Niektóre z tych reakcji są źródłem energii gwiazd. Bez kwantowej nieokreśloności Słońce świeciłoby inaczej⁸.

Są to koncepcje trudne do pogodzenia ze zdrowym rozsądkiem, ale nie zamierzam prezentować historii ich rozwoju ani dowodzić, że kwantowy świat rzeczywiście rządzi się tymi dziwnymi prawami. Istnieje wiele książek, w których można znaleźć wszystkie szczegóły. Skoncentrujemy się raczej na tym, w którym miejscu załamuje się interpretacja kopenhaska i jaka inna koncepcja mogłaby ją zastąpić. Nieokreśloność, a także dualizm falowo-korpuskularny, rzeczywiście wydają się na porządku dziennym w świecie kwantów i to z tego samego powodu. Równania, które opisują te zjawiska, zawierają liczbę znaną jako stała Plancka, od nazwiska jednego z pionierów fizyki kwantowej, Maxa Plancka. Wartość tej stałej jest bardzo mała w porównaniu z masami i pędami obiektów znanych z codziennego świata - wynosi ona $6,55 \times 10^{-27}$ erg x sekunda (nie przejmujemy się jednostkami - istotne jest porównanie z masami cząstek wyrażonymi w równorzędnych jednostkach, w gramach). Efekty kwantowe stają się istotne dla obiektów, których masy są porównywalnie małe, na przykład dla elektronu, którego masa wynosi 9×10^{-31} kg, lub - aby użyć jednostek bezpośrednio porównywalnych z jednostką erg x sekunda - 9×10^{-28} g. Jeżeli mamy do czynienia z obiektami o znacznie większych masach, to efekty kwantowe stają się tak małe, że ich wpływ można zignorować - oprócz faktu, że wszystko, co jest większe od atomów, składa się z atomów.

Warto spróbować sobie wyobrazić, jak bardzo skala świata kwantów różni się od skali obiektów znanych z codziennego doświadczenia. Liczba 10^{-27} oznacza jedną miliardową część z jednej miliardowej z jednej miliardowej. Jeżeli jakiś przedmiot ma długość równą 10^{-27} cm, to na długości 1cm zmieściłoby się miliard miliardów miliardów takich przedmiotów. Gdybyśmy zatem wzięli miliard miliardów miliardów przedmiotów o długości 1cm, na przykład kostek cukru - i ułożyli je jeden za drugim, to jaką zajęłyby odległość? Odpowiedź brzmi - 10^{27} cm. Ile to jest? Standardową jednostką odległości w astronomii jest rok świetlny, czyli odległość, jaką przebywa światło w ciągu jednego ziemskiego roku. Wynosi ona około 10^{18} cm. A zatem 10^{27} kostek cukru ułożonych jedna za drugą zajęłoby odległość miliarda (10^9) lat świetlnych. Najbardziej odległe obiekty znane we wszechświecie, tak zwane kwazary, znajdują się około 10 miliardów lat świetlnych od nas. Zatem 10^{27} kostek cukru zajęłoby jedną dziesiątą część drogi do najbardziej odległych znanych nam kwazarów. W pewnym przybliżeniu można więc powiedzieć, że świat kwantów działa w skali, która jest tyle razy mniejsza od kostki cukru, ile razy kostka cukru jest mniejsza od całego widocznego wszechświata. Innymi słowy, człowiek znajduje się mniej więcej w połowie - na tej logarytmicznej skali - między światem kwantów a całym wszechświatem. A mimo to człowiek twierdzi, że potrafi zrozumieć, co się dzieje na obu końcach tej skali.

Nie spodziewamy się, że dualna, falowo-korpuskularna natura będzie się przejawiać w zachowaniu lub właściwościach na przykład cegły, domu albo człowieka, gdyż obiekty te są bardzo

⁸ Por. J. Gribbin, *Blinded by the Light* [Oślepieni światłem].

duże w porównaniu ze stałą Plancka. Natomiast w przypadku obiektów kwantowych dualizm ten nie jest dla fizyków niczym nieoczekiwanym. Jednym z kluczowych aspektów interpretacji kopenhaskiej jest niemożliwość równoczesnego zaobserwowania obu tych właściwości. Bohr jednoznacznie stwierdził, że nie da się zobaczyć czegoś takiego jak foton lub elektron, czegoś wykazującego jednocześnie właściwości falowe i cząstkowe. Niestety (dla Bohra i dla interpretacji kopenhaskiej), jak się wkrótce przekonamy, eksperymetatorzy kwestionują także i to stwierdzenie.

W ostatecznym rozrachunku interpretacja kopenhaska zdaje egzamin w tym sensie, że pozwala na formułowanie przepisów - z uwzględnieniem nieoznaczoności, redukcji funkcji falowej, prawdopodobieństwa, roli obserwatora i holistycznych aspektów zjawisk kwantowych - które umożliwiają fizykom przewidywanie wyników eksperymentów, ale *n i e w y j a ś n i a*. Świadomość tego faktu nie jest niczym nowym. Einstein spędził dziesięć lat na utrzymanym w przyjaznym tonie korespondencyjnym pojedynku z Bohrem, próbując pokazać niedostatki i absurdalną naturę interpretacji kopenhaskiej. A najbardziej znany przykład tej absurdalności został wymyślony przez Schrödingera jako próba przekonania kolegów, iż cały ten zbiór koncepcji jest tak nonsensowny, że powinien zostać zarzucony. Mam na myśli oczywiście znany „eksperyment myślowy” z kotem w pudle (w 1995 roku kot ukończył 60 lat). Warto go przytoczyć jako przykład trudności, które jakakolwiek ulepszona interpretacja teorii kwantowej - czyli taka, która rzeczywiście coś *w y j a ś n i a* - musi pokonać.

Kot w pudle

Jedną z najdziwniejszych właściwości interpretacji kopenhaskiej, którą najlepiej ilustruje „eksperyment” z kotem w pudle, jest rola, jaką gra świadomy obserwator w przebiegu zdarzeń w mikroświecie. Wyobraźmy sobie pudło zawierające pojedynczy elektron. Jeżeli nikt nie zagląda do środka, to zgodnie z interpretacją kopenhaską są jednakowe szanse znalezienia elektronu w dowolnym miejscu pudła - fala prawdopodobieństwa związana z elektronem jest równomiernie rozłożona wewnątrz pudła. Wyobraźmy sobie teraz, że do pudła - do którego nadal nikt nie zagląda - zostanie wstawiona przegroda, która dzieli je na dwie jednakowe części. Zdrowy rozsądek podpowiada nam, że elektron musi znajdować się w jednej z dwóch części pudła, lecz interpretacja kopenhaska mówi, że fala prawdopodobieństwa jest nadal jednorodnie rozłożona wewnątrz obu części pudła. Oznacza to, że nadal mamy 50% szans na znalezienie elektronu w jednej albo w drugiej połowie pudła. Funkcja falowa redukuje się, a elektron staje się realny dopiero wtedy, gdy ktoś zajrzy do pudła i stwierdzi, w której jego części elektron się znajduje. W tym momencie fala prawdopodobieństwa po drugiej stronie pudła zanika. Gdy pudło zostanie zamknięte i nikt nie będzie patrzył na elektron, jego fala prawdopodobieństwa ponownie zacznie

się rozprzestrzeniać i wypełni tę połowę pudła, w której go znalaziono, lecz nie rozszerzy się z powrotem na drugą połowę pudła⁹.

Fizyk Paul Davies zwięźle podsumował tę sytuację: „Można powiedzieć, że przed pomiarem w obu komorach znajdowały się «duchy» elektronu, czekając, aż w wyniku obserwacji jeden z nich zmieni się w rzeczywisty elektron, a drugi natychmiast zniknie”¹⁰. Słowo „natychmiast” jest tutaj istotne, gdyż wskazuje, że stanowi to jeszcze jeden przykład działania nielokalności. Zanim przejdziemy do implikacji tego stwierdzenia, chciałbym opisać, w jaki sposób Schrödinger zademonstrował absurdalność twierdzenia, że za realność elektronu istniejącego w jednej lub w drugiej połowie pudła odpowiedzialny jest obserwator.

Zagadkę Schrödingera po raz pierwszy opublikowano w 1935 roku. Opiera się ona na realizacji układu kwantowego, w którym możliwe są dwa rezultaty pewnego eksperymentu, oba z jednakowym prawdopodobieństwem równym dokładnie 50%. W oryginalnej wersji swojego przykładu Schrödinger użył rozpadu radioaktywnego, ponieważ radioaktywne źródła także zachowują się zgodnie z regułami prawdopodobieństwa. Można jednak zmienić scenariusz eksperymentu i wykorzystać elektron w pudle z przegrodą. Schrödinger wyobrażał sobie przebieg eksperymentu w pewnego rodzaju stalowej komorze. W literaturze związanej z tą zagadką przyjęło się określenie „pudło” zawierające między innymi rzeczony kota. Ja wolałbym nieco bardziej wspaniałomyślną interpretację słowa „komora”, taką, która umożliwiłaby kotu komfortowe warunki życia (dopóki to możliwe). Nie zmienia to jednak w żadnym stopniu wagi argumentów Schrödingera.

Wyobraźmy sobie zatem, że cały dotychczas opisany układ - podwójne pudło, pojedynczy elektron i automatyczna przegroda - znajduje się na stole w zamkniętym i pozbawionym okien pomieszczeniu. Przegroda opada, dzieli pudło na dwie części i prawdopodobieństwo znalezienia elektronu w jednej z dwóch części wynosi dokładnie 50%. Na zewnątrz pudła znajduje się detektor elektronowy, który jest podłączony do zbiornika z gazem. Gdy detektor wykryje elektron, pomieszczenie zostanie w całości wypełnione trującym gazem. W rogu pomieszczenia siedzi nieświadomy niczego kot. Schrödinger nazwał ten układ „diabelskim urządzeniem”, ale należy pamiętać, że jest to tylko „eksperyment myślowy” i żaden prawdziwy kot nigdy nie został narażony na niżej opisane przykrości.

Schrödinger proponuje, abyśmy wyobrazili sobie, co się stanie, gdy jedna z dwóch części pudła zostanie automatycznie otwarta, co pozwoli uciec elektronowi, jeżeli akurat będzie się on znajdował po tej stronie przegrody. Ponieważ na razie nie została dokonana obserwacja tego, co się dzieje wewnątrz pomieszczenia, nadal - zgodnie z interpretacją kopenhaską - istnieje 50% szansy na to, że elektron znajduje się w zamkniętej części pudła, ale równie prawdopodobne jest

⁹ W każdym razie nie z równym prawdopodobieństwem; istnieje niewielka (b a r d z o niewielka) szansa, że elektron znajdzie się w drugiej połowie pudła, lub nawet całkiem poza pudłem, lecz na potrzeby niniejszego przykładu możemy ją pominąć.

¹⁰ P. Davies, J.R. Brown (red), *Duch w atomie*, s. 35.

teraz, że elektron wydostał się z pudła. Jest to eksperyment myślowy, więc możemy sobie wyobrazić, że nasz detektor jest dostatecznie czuły, aby wykryć obecność pojedynczego elektronu dodanego do zawartości pomieszczenia. Jeżeli elektron rzeczywiście opuścił pudło, to powinien zostać wykryty przez aparaturę detekcyjną, która uwolni trujący gaz, zabijając kota.

Możemy przypuszczać, że tak się właśnie stanie, nawet jeżeli nikt nie będzie patrzył na to, co się dzieje. Elektron albo wydostanie się z pudła, albo nie. Jeżeli nie, to kot jest bezpieczny. Jeżeli tak, to fala prawdopodobieństwa elektronu zredukuje się w chwili, gdy zostanie on „zauważony” przez detektor, przesądzając los kota. Bohr stwierdził jednak, że ten zdroworozsądkowy pogląd jest błędny.

Standardowa interpretacja teorii kwantowej mówi nam, że detektor także podlega kwantowym prawom, łącznie z regułami prawdopodobieństw, ponieważ detektor także składa się z mikroskopowych obiektów kwantowego świata (atomów, molekuł itd.), a oddziaływanie detektora z elektronem odbywa się właśnie na tym poziomie. Zgodnie z tym punktem widzenia funkcja falowa całego układu nie redukuje się, dopóki świadomy obserwator (najlepiej wyposażony w maskę gazową, jeżeli chce być cały czas przytomny) nie otworzy drzwi i nie zajrzy do środka. W tym i t y l k o w tym momencie elektron „decyduje się”, czy znajduje się wewnątrz czy na zewnątrz pudła, detektor „decyduje się”, czy znalazł elektron czy nie, i kot „decyduje się”, czy jest martwy czy żywy. Dopóki ktoś nie zajrzy do pomieszczenia, interpretacja kopenhaska opisuje sytuację w środku jako „superpozycję stanów”. Używając określenia Schrödingera, można powiedzieć, że znajduje się w nim „żywy i martwy kot, zmieszany lub (przepraszam za wyrażenie) rozmazany w równych częściach”¹¹.

Zależnie od punktu widzenia możemy wyobrażać sobie, że pomieszczenie zawiera kota, który jest równocześnie martwy i żywy, lub kota, który nie jest ani martwy, ani żywy, lecz przebywa w stanie nieokreśloności. Jeżeli jednak interpretacja kopenhaska jest poprawna, to dopóki ktoś nie zajrzy do środka, nie możemy wyobrażać sobie, że pomieszczenie zawiera po prostu martwego lub po prostu żywego kota.

Jedynym celem tego wywodu jest uwidocznienie absurdalności interpretacji kopenhaskiej, więc nie dziwny się, jeżeli znajdziemy w nim luki. Dostatecznie oczywiste pytanie, które natychmiast się nasuwa, brzmi: W jaki sposób zdefiniowany jest „świadomy” obserwator? Kot z całą pewnością jest dostatecznie kompetentny, aby wiedzieć, czy wciągnął do płuc truciznę i zdechł. Czy reakcja kota na wydarzenia w zamkniętym pomieszczeniu może odegrać taką samą rolę jak człowiek zagląający przez drzwi? Gdzie zatem leży granica? Przechodząc stopniowo od skali człowieka do świata kwantów: Czy mrówka jest zdolna do spowodowania kolapsu funkcji falowej? A bakteria?

Spójrzmy na problem od drugiej strony, od świata kwantów w górę. Można powiedzieć, że detektor nie potrafi spowodować redukcji funkcji falowej wykrytego elektronu, ponieważ sam detektor jest w całości zbudowany z obiektów kwantowych, takich jak atomy i molekuły - ale istota

¹¹ J. Wheeler, W. Żurek, *Quantum Theory and Measurement*, s. 157.

ludzka (albo kot) jest także zbudowana z atomów i molekuł. Jeżeli detektor nie jest kompetentny, aby spowodować kolaps, to dlaczego człowiek jest? Czy świadomy (w powyższym sensie) obserwator musi być żywą istotą? Czy odpowiednio wyposażony i zaprogramowany komputer byłby zdolny do wywołania kolapsu po prostu przez zajrzenie do pomieszczenia?

Pójdźmy jeszcze dalej. Co się stanie, jeżeli osoba, która spogląda przez drzwi, aby sprawdzić, czy kot jest żywy czy martwy, znajduje się sama w zamkniętym na noc budynku? Trzymając się ściśle interpretacji kopenhaskiej, stwierdzimy, że superpozycja stanów („rozmażany” stan układu, według Schrödingera) obejmie także tego obserwatora, dopóki ktoś inny, spoza budynku, nie zajrzy do środka, żeby sprawdzić, jak przebiega doświadczenie (lub ewentualnie zatelefonuje i zapyta, w jakim stadium znajduje się cały układ). Nie tylko kot, lecz także świadomy obserwator może znajdować się w stanie nieokreśloności, dopóki ktoś inny nie spojrzy na niego. A kto spogląda na tę osobę spoza budynku, aby wywołać kolaps jej funkcji? Czy ten proces będzie trwać *ad infinitum*, jako nieskończona sekwencja aktów obserwacji?

Podstawowe pytanie dotyczy kwestii, gdzie przebiega granica między kwantowymi prawdopodobieństwami a tym, co uważamy za rzeczywistość. Na przykład, ile molekuł musi zawierać jakiś system, żeby stał się on „rzeczywisty” i mógł redukować funkcje falowe? I jaki powinien być ten układ molekuł, aby to umożliwić?

Tego rodzaju pytania trapią współczesnych filozofów i fizyków kwantowych. Wszyscy oni wiedzą, że teoria kwantowa działa, ale chcą wiedzieć, dlaczego działa, a także mieć jakieś rozsądne pojęcie o tym, co się dzieje w zamkniętym pomieszczeniu, gdy nikt nie zagląda do środka. Co więcej, niektóre zagadki teorii kwantowej są jeszcze bardziej niezwykle niż ta prosta historia kota w pudle. Zanim przejdziemy do analizy mechaniki kwantowej, chciałbym nieco odsłonić głębsze aspekty tajemnic kwantowego świata z pomocą potomstwa kota Schrödingera.

Inny aspekt rzeczywistości

Aczkolwiek nikt tak naprawdę nie próbował zamknąć kota w opisany powyżej sposób, to pewien inny eksperyment myślowy - wykonany przez Alberta Einsteina tuż przed tym, jak Schrödinger stworzył zagadkę z kotem w pudle - został zrealizowany w latach osiemdziesiątych, symbolicznie podkreślając postępy, jakie poczyniła fizyka w dwudziestym stuleciu. Być może dobrze się stało, że Einstein nie dożył chwili, gdy jego eksperyment myślowy został zrealizowany, bo chociaż był zaprojektowany po to, aby podkreślić absurdalność teorii kwantowej, przeszła ona ten praktyczny test śpiewająco.

Einstein nie stworzył tej idei samodzielnie, lecz wspólnie z Borisem Podolskim i Nathanem Rosenem wkrótce po przybyciu do Princeton, na początku lat trzydziestych. Jej publikacja - sygnowana przez wszystkich trzech autorów - ukazała się w 1935 roku, tym samym, w którym Schrödinger opublikował swój paradoks kota w pudle. Stała się znana pod nazwą „paradoksu EPR”, gdyż podkreśla ona nielogiczną (z codziennego, zdroworozsądkowego punktu widzenia) naturę kwantowej rzeczywistości.

W 1951 roku zagadka została udoskonalona przez Davida Bohma - amerykańskiego fizyka, który osiadł w Anglii - ale przed długie lata stanowiła jedynie eksperyment myślowy. Dopiero w połowie lat sześćdziesiątych John Bell, irlandzki fizyk pracujący w CERN-ie w Genewie, znalazł sposób na przekształcenie jej w eksperyment, który mógłby - w zasadzie - zostać wykonany na dwóch fotonach wyemitowanych równocześnie przez atom w dwóch różnych kierunkach. W tym czasie nawet Bell nie sądził, że eksperyment taki dałoby się zrealizować, ale w ciągu następnych dwudziestu lat kilku badaczy podjęło wyzwanie i próbowało wykonać pomiary zależności opisanych przez Bella. Najbardziej ogólny i rozstrzygający z tych eksperymentów został wykonany przez Alaina Aspecta i jego współpracowników w Orsay pod Paryżem na początku lat osiemdziesiątych. Wykazali oni, że zdrowy rozsądek (i Einstein) jest w błędzie i że w kwantowym świecie rzeczywiście panuje nielokalność. To właśnie tę wersję paradoksu EPR - stworzoną przez Bella i zweryfikowaną przez Aspecta - będziemy analizować.

Właściwością fotonów, którą mierzył Aspect, jest tak zwana polaryzacja. Aby zrozumieć polaryzację, można sobie na przykład wyobrazić, że każdy foton niesie drążek ustawiony w pewnym kierunku - prostopadłym do kierunku ruchu fotonu - pionowo, poziomo lub skośnie. Niektóre z dziwnych właściwości spolaryzowanego światła omówimy w rozdziale trzecim; w tej chwili istotny jest tylko fakt, że te różne ustawienia polaryzacji fotonu da się zmierzyć, a ponadto, że są one z sobą skorelowane zgodnie z regułami kwantowymi. Upraszczając, nieco rzeczywistą sytuację - może się okazać, że jeden foton musi być spolaryzowany pionowo, a inny poziomo, lecz żadne reguły nie mówią, który foton w którym kierunku. Gdy atom wyemituje dwa fotony, to dopóki ktoś nie zmierzy polaryzacji jednego z nich, istnieją one, podobnie jak kot Schrödingera, jako superpozycja stanów. W momencie pomiaru funkcja falowa jednego fotonu redukuje się w jeden z możliwych stanów polaryzacji - na przykład pionowej. W tym samym momencie funkcja falowa drugiego fotonu musi się także zredukować - w tym wypadku do stanu o polaryzacji poziomej. Mimo że nikt nie patrzy na drugi foton, a w chwili pomiaru oba fotony mogły się znajdować daleko od siebie (w zasadzie nawet na dwóch krańcach wszechświata), to funkcja falowa drugiego fotonu musi się zredukować wraz z funkcją falową pierwszego. To właśnie Einstein nazwał „widmowym działaniem na odległość”, gdyż dwa obiekty kwantowe (w tym wypadku dwa fotony) pozostają związane ze sobą na zawsze. Gdy jeden zostanie szturchnięty, to drugi natychmiast zareaguje, niezależnie od tego, jak daleko od siebie się znajdują.

Dla Einsteina było to nie do przyjęcia, ponieważ, jak się wkrótce przekonamy, jego teoria względności oparta jest na fakcie, że światło zawsze porusza się z tą samą prędkością i że nie da się żadnego obiektu przyspieszyć do prędkości większej niż prędkość światła. Zgodnie z teorią względności, przynajmniej w jej pierwotnym ujęciu, nic nie może w sposób natychmiastowy łączyć dwóch oddalonych od siebie w przestrzeni cząstek. Nie można wykluczyć, że, jak wkrótce zobaczymy, może to pociągać za sobą konsekwencje, z jakich nawet Einstein nie zdawał sobie sprawy, ale w owym czasie był to, zwłaszcza dla niego, potężny argument przeciwko możliwości istnienia tego rodzaju działania na odległość.

W jaki sposób można uzyskać eksperymentalny dowód potwierdzający (lub wykluczający) widmowe działanie na odległość? Nie wystarczy zmierzyć polaryzacji obu fotonów, gdyż zawsze otrzyma się właściwą odpowiedź (w naszym przykładzie jeden jest spolaryzowany pionowo i jeden poziomo), ale nie da się „zobaczyć” natychmiastowego oddziaływania w akcji. Wszystko, co zobaczymy, wykonując tego rodzaju pomiar, to właściwości każdego fotonu z osobna, które tak czy owak mogły być ustalone już w momencie, gdy fotony opuszczały atom - co właśnie zdrowy rozsądek podpowiada. Aby uchwycić zjawisko działania na odległość (nielokalność), trzeba się uciec do sztuczki, która polega na wykonaniu pomiarów dwóch (po jednym dla każdego fotonu) spośród trzech powiązanych ze sobą właściwości. W przypadku eksperymentu Aspecta były to trzy kierunki polaryzacji.

Ponieważ polaryzacja jest trudną do zrozumienia właściwością, posłużymy się analogią do kolorowych cząstek, zastrzegając, że zespół Aspecta nie wykonywał w rzeczywistości pomiarów kolorów. Umówmy się, że atom nie emituje par fotonów, lecz pary kolorowych cząstek, coś w rodzaju malutkich kul bilardowych. Kolor każdej kulki może być czerwony, żółty lub niebieski, ale w każdej wyemitowanej parze kulki muszą być różnego koloru.

Przekładając to z powrotem na język kwantowy, powiemy: gdy atom wyrzuca dwie kulki w przeciwnych kierunkach, to zgodnie z interpretacją kopenhaską żadna kulka nie ma określonego koloru. Obie istnieją w superpozycji trzech możliwych stanów (kolorów). Gdy eksperymentator „popatrzy” na jedną kulkę, jej funkcja falowa zredukuje się i kulka wybierze jeden określony kolor. W tym samym momencie zredukuje się także funkcja falowa drugiej kulki i ona również wybierze jeden z dwóch pozostałych kolorów - ale na podstawie naszego pojedynczego pomiaru (koloru pierwszej kulki) nie możemy stwierdzić, który.

Założmy teraz, że możemy wykonać pomiar, który określi, czy kolor pierwszej kulki jest niebieski. Odpowiedź na to pytanie będzie zawierać informację o stanie, w który zredukuje się druga kulka, ale informacja ta nie będzie kompletna. Przypuśćmy, że kolor kulki jest niebieski. Wtedy stan drugiej kulki musi być czerwony lub żółty. Drugi możliwy wynik naszego pomiaru, to „nie niebieski”. W tym wypadku, ponieważ kolor pierwszej kulki może być zarówno czerwony, jak i żółty, druga kulka może być dowolnego koloru, ale jest bardziej prawdopodobne, że będzie niebieska niż żółta lub czerwona. Powód jest następujący.

Jeżeli pierwsza kulka jest niebieska, to druga musi być czerwona lub żółta, więc mamy 50% szansy na jeden z tych dwóch kolorów. Jeżeli jednak pierwsza kulka jest „nie niebieska”, to może ona przyjąć jeden z dwóch różnych stanów. Po pierwsze, może ona być czerwona. Wtedy druga może być albo niebieska, albo żółta. Po drugie, pierwsza kulka może być żółta. Wtedy druga kulka może być albo niebieska, albo czerwona. Tak więc mamy c z t e r y możliwości dla drugiej kulki. Dwie z tych czterech możliwości to kolor niebieski, więc mamy 50% (2 z 4) szansy, że druga kulka jest niebieska. Trzecia możliwość to czerwona, a czwarta - żółta, więc mamy 25% (1 z 4) szansy, że druga kulka jest czerwona i 25%, że żółta. Gdy już ktoś na nią popatrzy, to będzie

oczywiście musiała przybrać jeden z trzech kolorów, więc prawdopodobieństwa zsumują się, rzecz jasna, do 100%.

Fakt wykonania pomiaru stanu pierwszej kulki zmienia szansę znalezienia określonego koloru przy pomiarze stanu drugiej kulki. Aby stwierdzić, jak te szanse się zmieniają w wyniku pomiarów stanu pierwszej kulki, trzeba wielokrotnie powtórzyć pomiary, na bardzo wielu parach kulek, podobnie jak przy rzucie monetą, gdzie rozkład wyników pół na pół wyłania się po długiej serii rzutów. Jak pokazał Bell, istotny jest tutaj fakt, że jeżeli istnieje nielocalne oddziaływanie, to te statystyczne prawdopodobieństwa, które wyłonią się z długiej serii pomiaru kolorów, są inne niż gdyby kulki „decydowały” o wyborze koloru już w momencie opuszczania atomu i potem trwały niezmiennie w tym stanie.

W naszym języku kolorów eksperyment polega na zadawaniu par pytań - po jednym na każdy foton z danej pary: „Czy pierwszy foton jest niebieski, a drugi żółty?” albo „Czy pierwszy foton jest niebieski, a drugi czerwony?” Jeśli powtórzy się taki eksperyment wielokrotnie na wielu parach fotonów, to uzyska się długą listę odpowiedzi, określającą, jak często fotony są w stanach „niebieski i nie czerwony”, jak często w stanach „nie niebieski i nie żółty”, jak często w stanach „niebieski i nie żółty” i tak dalej. W rezultacie wyłonią się z tej listy statystyczne zależności określające, jak często pojawia się na przykład kombinacja „niebieski i nie żółty” w porównaniu z kombinacją „nie niebieski i nie czerwony”, a także oczywiście częstości występowania wszystkich innych możliwych kombinacji. Bell pokazał, że te statystyczne zależności są inne w świecie kwantów niż w świecie rządzącym się zdrowym rozsądkiem, ponieważ obiekty kwantowe decydują o swoim kolorze dopiero wtedy, gdy na nie spojrzymy, a obiekty obdarzone zdrowym rozsądkiem mają określony kolor w momencie opuszczania atomu i później już go nie zmieniają.

Bell pokazał, że jeżeli światem kwantów rządzi zdrowy rozsądek, to jeden określony zestaw pomiarów - jedna kombinacja kolorów, którą nazwiemy kombinacją A - musi zawsze pojawiać się c z ę ś c i e j niż inny określony zestaw - kombinacja, którą nazwiemy B. Zdroworozsądkowa logika mówi nam, że kombinacja A pojawia się częściej niż B, ale eksperyment Aspecta (i wiele innych podobnych eksperymentów) wykazał, że jest na odwrót. Z m i e r z o n a liczba wystąpień kombinacji A okazała się m n i e j s z a niż liczba wystąpień kombinacji B.

Aczkolwiek rozumowanie Bella jest sformułowane w języku matematyki, opiera się ono na prostych zasadach zdroworozsądkowej logiki. Na przykład, logika mówi nam, że liczba nastolatków musi być mniejsza niż liczba nastolatków płci żeńskiej w połączeniu z liczbą wszystkich osób płci męskiej. Wynik eksperymentu Aspecta jest, w sensie logicznym, równoważny odkryciu, że na świecie jest więcej nastolatków niż nastoletnich dziewcząt i mężczyzn (i nastoletnich, i dorosłych) łącznie. Nierówności Bella są łamane, co dowodzi nielokalności obiektów kwantowych i raz jeszcze przyznaje słuszność teorii kwantowej - ale nadal nie wiemy, co to wszystko z n a c z y .

Sam Bell uważał mechanikę kwantową za „tymczasowe rozwiązanie”¹² i zawsze miał nadzieję, że fizycy w końcu odkryją teorię, która także i te dziwy potrafiłaby wytłumaczyć w kategoriach realnego świata, istniejącego nawet wtedy, gdy nikt na niego nie patrzy i nikt go nie mierzy. Mimo że wynik eksperymentu Aspecta był, w powyższym sensie, przeciwny do tego, na co Bell miał nadzieję (ale nie do tego, czego się spodziewał, w świetle uprzednich triumfów teorii kwantowej), nieco później powiedział on Nickowi Herbertowi, fizykowi, że był „zachwycony tym, iż w tak zawilej i niejasnej dziedzinie udało mu się stworzyć coś klarownego i solidnego”, nawet gdy się okazało, że to coś jest sprzeczne ze zdrowym rozsądkiem i jego własnymi uprzedzeniami¹³.

Konsekwencje eksperymentu Aspecta przeniesione na nasz nieco prostszy przykład oznaczają, że jeżeli atom emituje dwie cząstki w dwóch przeciwnych kierunkach, a reguły kwantowe wymagają, aby jedna z nich była czerwona, a druga żółta, lecz nie wyszczególniają, która ma być jakiego koloru, to cząstki istnieją w superpozycji stanów do momentu, gdy świadomy obserwator stwierdzi, jakiego koloru jest jedna z nich. W tym momencie funkcja falowa tej cząstki zredukuje się do określonego koloru i równocześnie funkcja falowa drugiej cząstki zredukuje się do drugiego koloru. Raz jeszcze warto podkreślić, że nie jest to bynajmniej ani fantazja szalonego teoretyka, ani nawet dokładnie rozważony, lecz myślowy eksperyment. To nielocalne zachowanie zostało doświadczalnie zaobserwowane i stwierdzone w eksperymentach z fotonami. Zmieniając nieznacznie scenariusz, aby zamiast fotonów wystąpiła para kotków i jeden elektron, możemy tak przekształcić słynny eksperyment myślowy Schrödingera, aby uwzględnić pomiary Aspecta i łamanie nierówności Bella. W ten sposób ponownie przekonamy się, jakie właściwie są konsekwencje nielokalności i działania na odległość.

Potomstwo kota Schrödingera

Dotarliśmy do sedna naszej historii. Oto główny problem w całej swojej krasie.

Wyobraźmy sobie dwa kotki, bliźniacze potomstwo kota Schrödingera, żyjące w dwóch oddzielnych kosmicznych kapsułach, obsługiwane i karmione przez automatyczne urządzenia kontrolne. Obie kapsuły są połączone wąskim kanałem, w środku którego znajduje się pudło z automatyczną przegrodą, zawierające - co wszyscy już odgadli! - pojedynczy elektron. Obie kapsuły są oczywiście wyposażone w typowe diabelskie urządzenie, które uśmierci zamieszkującego daną kapsułę kota, jeżeli elektron wyłoni się z kanału po tej stronie, po której znajduje się kapsuła. Nic nie może przedostać się z jednej kapsuły do drugiej, gdyż pudło z elektronem całkowicie blokuje kanał łączący kapsuły, ale tym razem także na końcach pudła znajdują się automatyczne zasuwki.

Pamiętamy, że dopóki nikt nie zagląda do wnętrza, fala prawdopodobieństwa elektronu wypełnia równomiernie całe pudło. Gdy automatyczna przegroda podzieli pudło na dwie połowy, elektron ma 50% szansy na znalezienie się w każdym z dwóch przedziałów. Gdy podniosą się

¹² P. Davies, J.R. Brown (red.), *Duch w atomie*, s. 70.

¹³ List do Herberta, cytowany w jego książce *Quantum Reality*, s. 212.

zasuwy na końcach pudła, fala prawdopodobieństwa rozprzestrzeni się równomiernie na obie kapsuły. Następnie kanał łączący kapsuły zostanie automatycznie rozłączony, dokładnie w płaszczyźnie przegrody, która dzieliła pudło na dwie części. Dwie kapsuły zostaną tym samym fizycznie oddzielone. Każda z nich będzie zawierać automatycznie karmionego kota, diabelskie urządzenie, które uśmierci kota, gdy wykryje elektron, oraz 50% fali elektronu. Wszystko - fala elektronu, diabelskie urządzenie i koty - znajdują się teraz w superpozycji stanów.

Jest to tylko eksperyment myślowy, więc możemy wyposażyć nasze hipotetyczne kapsuły w najlepsze urządzenia napędowe dopuszczalne przez prawa fizyki - nie pozwolimy oczywiście, aby naruszyły one ograniczenia teorii względności Einsteina, podróżując szybciej od światła. Ponadto założymy, że kotki należą do odpornej na niewygody i długowiecznej (za zgodą diabelskich urządzeń) rasy. Teraz, gdy kapsuły są już rozdzielone, automatyczne rakiety mogą zostać odpalone i ponieść kapsuły w przeciwne strony przestrzeni kosmicznej. Będą podróżować wiele lat, zanim jedna z nich dotrze do odległej planety, zamieszkaanej przez świadomych (i inteligentnych) obserwatorów. Druga kapsuła - niesiona w przeciwnym kierunku przez superwydajne rakiety - będzie wtedy oddalona o ponad rok świetlny.

Zaintrygowani zawartością kapsuły mieszkańcy planety otwierają włącznik i zagląдают do środka. W tym momencie funkcja falowa wewnątrz kapsuły redukuje się i „decyduje”, czy elektron dostał się do tej kapsuły, czy do drugiej. Jeśli do tej, to kot ginie - lub raczej w chwili dokonania obserwacji okazuje się, że kot był martwy przez cały czas od chwili, gdy elektron został uwolniony ze swojego pudła. W momencie, gdy kosmici spoglądają na martwego kota, drugi kot zostaje uwolniony z superpozycji stanów i „staje się” żywy. Możliwy jest oczywiście odwrotny scenariusz - kosmici mogą, otworzywszy kapsułę, znaleźć żywego kota. W tym wypadku ich akt obserwacji staje się wyrokiem śmierci dla drugiego kota. To niekoniecznie oznacza, że oba koty były przez cały ten czas równocześnie żywe i martwe. W ciągu kilku lat spędzonych w podróży kapsuły zawierały jednego żywego i jednego martwego kota, ale było całkowicie nieokreślone, która którego. Lub też każda kapsuła zawierała dwa duchy, stanowiące dwie wersje historii, z których jedna się urzeczywistniła, a druga ulotniła w momencie obserwacji.

Z punktu widzenia interpretacji kopenhaskiej jest obojętne, jak zinterpretujemy powyższy przebieg wydarzeń. Nie istnieje oficjalna interpretacja na tym poziomie - wszystko, o co interpretacja kopenhaska się troszczy, to pewność, że jeżeli przeprowadzimy taki sam eksperyment tysiące razy na tysiącach par kotków, to okaże się, że połowa kotków lądujących na odległej planecie jest żywa i połowa martwa, a ich partnerzy znajdują się w przeciwnym stanie. Standardowa interpretacja nie ma nawet nic do powiedzenia na temat sugestii, że oprócz nielokalnego działania na odległość - które przekazuje sygnał z jednej kapsuły do drugiej, natychmiast gdy tylko funkcja falowa się redukuje - z pewnego punktu widzenia możemy doszukiwać się w tej historii również elementów podróży w czasie.

Można powiedzieć, że akt obserwacji powoduje wysłanie sygnału nie tylko w przestrzeni, lecz także w czasie - wstecz, aż do momentu, gdy elektron został uwolniony - wymuszając decyzję o

wyborze kapsuły, do której dostał się elektron. W gruncie rzeczy koncepcja ta nie jest trudniejsza do przyjęcia, gdyż z teorii względności Einsteina wynika między innymi, że j e ż e l i sygnał poruszałby się szybciej niż światło, to zarazem podróżowałby on wstecz w czasie (co stanowi oczywiście jedną z przyczyn, dla których taka „ponadświatlna” sygnalizacja jest zazwyczaj dyskwalifikowana jako niemożliwa).

Zgoda na uwzględnienie ewentualności, że sygnały mogą poruszać się wstecz w czasie, może się wydawać zbyt radykalna, ale miałaby ona tę zaletę - gdyby udało się sygnały te włączyć w ogólną interpretację kwantowego świata - że zniknęłyby widmowe superpozycje stanów, charakterystyczne dla losów kota Schrödingera i jego kociąt. Sam Bell wspomniał kiedyś, że gdyby musiał dokonać wyboru, to wolałby pozostać przy koncepcji obiektywnego realizmu za cenę odrzucenia poglądu, że sygnały nie mogą poruszać się szybciej niż światło¹⁴. Żeby jednak zrozumieć, dlaczego stanowi to drastyczny, a zarazem (być może) dopuszczalny wybór, musimy wiedzieć nieco więcej o naturze światła, którego zachowanie leży u podstaw zrozumienia zarówno teorii względności, jak i mechaniki kwantowej.

Jeżeli należysz, czytelniku, do osób, które najpierw czytają ostatnią stronę powieści detektywistycznej, lub do tych, które sądzą, że znają standardową interpretację zarówno teorii względności, jak i fizyki kwantowej, to z całą pewnością możesz rzucić teraz okiem na epilog. Ale nawet jeżeli to uczynisz, to obiecaj, że wrócisz i przeczytasz resztę książki, ponieważ - jak wszyscy autorzy dobrych powieści detektywistycznych - mam w zanadru kilka sztuczek, którymi chcę cię zabawić pomiędzy zawiązaniem akcji a finałem. Niektóre z tych sztuczek wymagają luster, podobnie jak numery najlepszych sztukmistrzów, a wszystkie one odzwierciedlają tajemniczą naturę światła.

¹⁴ P. Davies, J.R. Brown (red), *Duch w atomie*, s. 69.

Rozdział pierwszy

Antyczne światło

To, co w nauce jest uważane za historię starożytną, zależy w dużej mierze od punktu widzenia. Opisy wszechświata i jego funkcjonowania - teorie i modele matematyczne, które nie zawierają elementów mechaniki kwantowej, są często określane jako teorie „klasyczne”. Według tego kryterium Isaac Newton był fizykiem klasycznym, tak samo jak Archimedes. Według tej definicji nawet obie teorie względności Einsteina są teoriami klasycznymi. Mimo to mechanika kwantowa i teoria względności stanowią dwa filary współczesnej fizyki. Obie spowodowały zmianę sposobu widzenia świata przez naukowców i obie pojawiły się na początku dwudziestego wieku. Tak więc, według nieco innego podejścia, antyczna historia nauki dotyczy wszystkiego sprzed roku 1900. Opisując historię badań światła, będę używał określenia „antyczny” w tym drugim znaczeniu - jako dotyczącego wszystkiego od czasów starożytnych Greków do Jamesa Clerka Maxwella, który w dziewiętnastym stuleciu wykazał, że światło jest formą promieniowania elektromagnetycznego.

Dawni filozofowie sądzili, że światło powstaje w oku i rozchodzi się podobnie jak promień latarni morskiej, lub jak laska niewidomego, aby „wyczuć” naturę otaczającego świata. Żyjący w piątym wieku przed naszą erą Empedokles, który był twórcą koncepcji czterech „żywiołów” (ziemi, powietrza, ognia i wody), opisał, w jaki sposób Afrodyta uformowała z czterech elementów ludzkie oko, spojone przez miłość. Wzniciła ogień oka w palenisku wszechświata, tak aby działało jak latarnia, wysyłając ogień na zewnątrz i umożliwiając tym samym widzenie¹⁵.

Empedokles zdawał sobie sprawę, że nie może to być takie proste i że ciemność nocy jest spowodowana faktem, iż Ziemia zasłania światło biegnące od Słońca do Ziemi. Żyjący w trzecim wieku przed naszą erą Epikur wyznawał podobne poglądy, które podsumował rzymski autor, Lukrecjusz, w swoim dziele *O naturze wszechrzeczy* w 55 roku p.n.e.: „Światło i ciepło słońca składają się z maleńkich atomów, które, raz popchnięte, nie tracą czasu i pędzą poprzez przestrzeń powietrzną w kierunku nadanym im przez pchnięcie”. Jak na tamte czasy, jest to zadziwiająco trafny opis, lecz nie odzwierciedla on ówczesnych poglądów. Koncepcja, zgodnie z którą światło wychodzi z oka, przetrwała wiele stuleci. Platon, żyjący od około 428 do 347 roku p.n.e., pisał o zaślubinach wewnętrznego i zewnętrznego światła. Euklidesowi, żyjącemu od około 330 do 260 roku p.n.e., nie dawała spokoju prędkość, z jaką „działa” wzrok. Zauważył on, że jeśli zamknąć oczy, a następnie otworzyć je ponownie, to nawet odległe gwiazdy pojawiają się natychmiast w polu widzenia, mimo że możemy je zobaczyć dopiero wtedy, gdy sygnał wzrokowy przebędzie drogę od oczu do gwiazd i z powrotem!

Jakkolwiek dziwne mogą się nam wydawać te koncepcje, nie były one poważnie kwestionowane - mimo zainteresowania Lukrecjusza pracami Epikura - aż do końca pierwszego

¹⁵ Por. K. Freeman, *Ancilla to the Pre-Socratic Philosophers*.

tysiąclecia naszej ery. Jednym z powodów była oczywiście średniowieczna zapaść cywilizacji europejskiej po upadku Zachodniego Cesarstwa Rzymskiego. Rzymianie nie byli zresztą wielkimi miłośnikami nauki i - po przypadkowym spłonięciu wielkiej biblioteki Aleksandryjskiej w czasach Juliusza Cezara, kiedy to większość dzieł naukowych Greków poszła z dymem - nigdy nie zdołali dorównać Grekom. Jeszcze więcej ksiąg zostało zniszczonych lub zaginęło, gdy imperium się rozpadło, i w rezultacie przez ponad tysiąc lat w Europie „praca naukowa” polegała jedynie na pielęgnowaniu idei starożytnych i próbach zachowania ich poglądów.

Pierwszym uczonym, który posunął się dalej niż Grecy w jakiegokolwiek dziedzinie nauk, był arabski badacz żyjący od około 965 do 1038 roku, w szczytowym okresie wielkiej cywilizacji Islamu. Olbrzymia część tego, co wiemy o starożytności i o starożytnej nauce, pochodzi z dokumentów tłumaczonych z greki lub innych języków starożytnych na arabski, a później z arabskiego na języki europejskie. W wielu wypadkach starożytne teksty przeniknęły do kultury arabskiej przez cesarstwo wschodniorzymskie - Bizancjum, które przetrwało niemal tysiąc lat po upadku Rzymu, aż do 1453 roku. Stosunki Bizancjum ze światem arabskim były, oględnie mówiąc, burzliwe, lecz obejmowały także wymianę idei.

Opierając się na koncepcjach starożytnych i ulepszając je (pamiętajmy, że nasz system liczbowy pochodzi od Arabów), arabscy uczeni przekazali kulturze Europy Zachodniej bogate dziedzictwo, które odegrało główną rolę w odrodzeniu się nauki. Badanie światła stanowi doskonały przykład tego przekazu.

Pierwszy nowoczesny uczony

Abu Ali al-Hassan ibn al-Haytham był najwybitniejszym uczonym średniowiecza. Przez ponad 500 lat, aż do czasów Galileusza, Keplera i Newtona, nie odnotowano ważniejszych osiągnięć, niż te, których on dokonał. W Europie znany był (w późniejszym okresie) jako Alhazen. Napisał dużo książek (dzisiaj powiedzielibyśmy, że były to publikacje naukowe) z matematyki i innych dziedzin nauki, ale jego największym dziełem jest seria siedmiu ksiąg o optyce napisanych przed lub tuż po roku 1000. Prace te zostały przetłumaczone na łacinę (język inteligencji i nauki używany przez wykształconych ludzi w Europie jeszcze długo po czasach Newtona) pod koniec dwunastego wieku, ale opublikowane w Europie (nadal po łacinie) jako *Opticae thesaurus* [Skarbiec optyki] dopiero w 1572 roku. Czytane przez wielu, stały się inspiracją dla myślicieli, którzy zainicjowali rewolucję naukową w Europie w siedemnastym wieku.

Alhazen wykorzystał wiele logicznych argumentów do uzasadnienia swojego poglądu, że wzrok nie jest rezultatem jakiegoś wewnętrznego światła wychodzącego z oka na zewnątrz i badającego świat dookoła, lecz wyłącznie skutkiem wnikania do oka światła z zewnątrz. Jeden z jego argumentów dotyczył znanego zjawiska powidoków. Jeśli będziemy patrzeć na jasne źródło światła przez około pół minuty, a następnie zamkniemy oczy, to „zobaczymy” zarys tego obiektu,

zazwyczaj w innym kolorze (zwanym kolorem dopełniającym) niż oryginał¹⁶. Takie powidoki mogą trwać - jako „plamy przed oczami” - nawet po ponownym otwarciu oczu. Alhazen wnioskował, że zjawisko to może być wyłącznie wynikiem jakiegoś zewnętrznego czynnika, który wywiera tak silny wpływ na oczy, że efekt pozostaje nawet po zamknięciu oczu, gdy światło nie może ani wejść, ani wyjść z oczu.

Jeszcze kilka innych zjawisk Alhazen zinterpretował jako skutek światła wpadającego do oka z zewnątrz, lecz największy wpływ na naukowe zrozumienie zachowania światła wywarło jego omówienie procesu tworzenia się obrazów w urządzeniu zwanym *camera obscura*. Określenie to znaczy dosłownie „komora ciemna” (lub „ciemny pokój”), a samo zjawisko było z pewnością znane starożytnym, ale jego pierwszy klarowny opis znajduje się w dziełach Alhazena. Aby je zaobserwować, trzeba szczelnie zasłonić okno w jasny, słoneczny dzień, a następnie zrobić mały otwór - mniej więcej wielkości kulki na końcu długopisu - przez który do pokoju dostanie się trochę światła. Na przeciwległej ścianie zobaczymy obraz zewnętrznego świata - odwróconą, pełnobarwną projekcję tego, co bez zasłony byłoby widać przez okno.

Efekt jest tak spektakularny, że nawet dzisiaj, w dobie telewizji, w niektórych miastach można znaleźć nowoczesną wersję *camera obscura* traktowaną jako atrakcję turystyczną. To samo zjawisko zachodzi w tak zwanej kamerze bezsoczewkowej¹⁷, w której ciemną komorą może być pudełko po butach, lub jakiegokolwiek pudełko o podobnych rozmiarach, z małą dziurką w jednej ścianie i z kalką techniczną wklejoną w miejsce wyciętej przeciwległej ścianki, grającą rolę ekranu. Gdy ściankę z dziurką ustawi się do światła, a drugą stronę pudełka (wraz z ekranem i własną głową) zaciemni (na przykład przykrywając je kocem), to na ekranie będzie widoczny odwrócony obraz otoczenia. *Camera obscura* stała się prototypem (a zarazem źródłosłowem¹⁸) aparatu fotograficznego. Ale jak ona działa?

Kluczowy element, z czego zdał sobie sprawę Alhazen, stanowi fakt, że światło porusza się po liniach prostych. Wyobraźmy sobie, że w pewnej odległości w ogrodzie za domem rośnie drzewo - na wprost tego pomieszczenia, które stanowi *camera obscura*. Linia prosta biegnąca od wierzchołka drzewa przez otwór w zasłonie trafi na ścianie naprzeciw okna w punkt położony blisko podłogi. A linia prosta biegnąca od podstawy drzewa trafi, po przejściu przez otwór w zasłonie, w punkt położony blisko sufitu. Linie proste biegnące od wszystkich innych punktów drzewa, przechodzące przez ten sam otwór w zasłonie, trafią na przeciwległej ścianie w inne miejsca, a ich położenie nietrudno przewidzieć. W rezultacie na ścianie powstanie odwrócony obraz drzewa (a także wszystkiego, co się znajduje w ogrodzie).

Alhazen wyobrażał sobie światło jako strumień maleńkich cząstek, produkowanych przez Słońce oraz przez płomienie ognia na Ziemi, poruszających się wzdłuż linii prostych i odbijających

¹⁶ Jednak nigdy nie należy patrzeć wprost na Słońce, gdyż nawet krótkotrwałe spojrzenie na nie może spowodować trwałe uszkodzenie oczu.

¹⁷ W oryginale: *pinhole camera* (przyp. tłum.).

¹⁸ *Camera* (ang.) - aparat fotograficzny (przyp. tłum.).

od obiektów, na które natrafiają na swej drodze. Światło biegnące od Słońca odbija się od drzewa w ogrodzie, biegnie przez otwór w zasłonie, odbija się od ściany w zaciemnionym pokoju i w końcu wpada do naszego oka, dzięki czemu widzimy obraz w *camera obscura*. Alhazen zdawał sobie sprawę z tego, że światło nie może poruszać się z nieskończoną prędkością, ale prędkość ta musi być bardzo duża. Wiedząc, że prosty pręt, gdy jeden jego koniec zanurzymy w wodzie, wygląda tak, jakby był zgięty, Alhazen zrozumiał, że efekt ten, zwany obecnie refrakcją, jest spowodowany tym, że światło porusza się z różną prędkością w wodzie i w powietrzu. Studiował także soczewki oraz lustra wklęsłe i wypukłe. Pokazał, że krzywizna soczewki umożliwia skupianie światła dzięki refrakcji.

Europa w jedenastym stuleciu nie była jednak na to wszystko przygotowana. Pierwszym, który przejął pałeczkę po Alhazenie, był Johannes Kepler, pamiętany dzisiaj głównie dzięki odkryciu praw rządzących ruchami planet wokół Słońca. Kepler żył w latach od 1571 do 1630. Na początku siedemnastego wieku, opierając się na omówieniu Alhazena z *Opticae thesaurus*, Kepler opisał ludzkie oko jako rodzaj kamery ze światłem wchodzącym do oka przez źrenicę i tworzącym obraz na siatkówce. Zagadka, dlaczego widzimy świat „do góry głową”, skoro obraz na siatkówce jest odwrócony, pozostała nie rozwiązana przez całe wieki. Rene Descartes udowodnił, że rzeczywiście jest on odwrócony, gdy wyjął oko martwego wołu, zdrapał tylną ściankę, aby uczynić ją przezroczystą - i zobaczył utworzony na siatkówce obraz. Obecnie wiemy, że ludzki mózg automatycznie koryguje odwrócony przez siatkówkę obraz, podobnie jak obraz na ekranie telewizora może być elektronicznie przetworzony i odwrócony.

Mniej więcej w tym czasie (Kartezjusz żył w latach od 1596 do 1650 roku) nastąpiła eksplozja zainteresowania światłem. Galileusz, który urodził się w 1564 roku (roku urodzenia Williama Szekspira), a zmarł w 1642 (roku urodzenia Isaaca Newtona), dowiedział się w 1608 roku o wynalezieniu teleskopu przez pewnego holenderskiego optyka. Bardzo szybko wykonał własną wersję teleskopu i - kierując go w niebo - dał początek nowoczesnej astronomii, rozszerzając granice widzialnego wszechświata. Wkrótce potem wynaleziony został mikroskop, co umożliwiło uczonej poznanie także mikroświata. Posługując się teleskopem, Galileusz odkrył w 1610 roku cztery największe księżycy Jowisza. Późniejsze obserwacje ruchów tych księżyców umożliwiły pierwszy w historii pomiar prędkości światła¹⁹.

Sztuki tej dokonał duński astronom, Ole Romer, a polegała ona na pomiarach odstępów czasowych między zaćmieniami księżyców spowodowanymi przez samego Jowisza. Wydawało się, że momenty zaćmień zależą od tego, czy Ziemia znajduje się po tej samej, czy po przeciwnej stronie Słońca co Jowisz. Romer zauważył, że różnice te można wyjaśnić, jeśli się uwzględni dodatkowy czas, potrzebny światłu na dotarcie od księżyców Jowisza do Ziemi, gdy znajduje się ona po przeciwnej stronie Słońca. Współczesne dane mówią, że światło potrzebuje ponad osiem

¹⁹ Wcześniejsze próby zmierzenia prędkości światła (podejmowane między innymi przez Galileusza) nie powiodły się głównie ze względu na fakt, że nie zdawano sobie sprawy z olbrzymiej dysproporcji między prędkością światła a typowymi prędkościami makroskopowych ciał materialnych (przyp. tłum.).

minut - poruszając się z prędkością 300 000 km/s - aby dotrzeć od Słońca do Ziemi, czyli aby przebyć połowę średnicy orbity Ziemi. Zatem maksymalne „opóźnienie” w obserwacji zaćmienia księżyców Jowisza wynosi dwa razy tyle - czyli ponad kwadrans.

W tym samym dziesięcioleciu, w którym Rømer pokazał, jak zmierzyć prędkość światła, uwagę środowiska naukowego w Anglii po raz pierwszy zwrócił na siebie człowiek, który wkrótce zmienił oblicze nie tylko optyki, ale całej nauki. W 1672 roku Isaac Newton opublikował swoją pierwszą pracę naukową. Jej tematem była natura światła.

Od Woolsthorpe do Cambridge i z powrotem

Niewiele brakowało, a Newton nie zostałby uczonym - w każdym razie nie naukowcem z uniwersyteckim wykształceniem i członkiem Royal Society²⁰. Urodził się - przed terminem - w dzień Bożego Narodzenia 1642²¹ roku w Woolsthorpe w pobliżu Grantham, w hrabstwie Lincolnshire. Nikt się nie spodziewał, że małe, chorowite niemowlę przeżyje choć jeden tydzień. Jego ojciec, także o imieniu Isaac, zmarł przed urodzeniem syna, co zresztą miało swoje dobre strony w późniejszym okresie życia Newtona. Gdy trzy lata po urodzeniu syna jego matka powtórnie wyszła za mąż i przeniósła się do sąsiedniej miejscowości, North Witham, mały Isaac został wysłany do dziadków ze strony matki. Żaden Newton przez Isaakiem nie otrzymał nigdy wykształcenia i najprawdopodobniej Isaac nie byłby wyjątkiem, gdyby żył jego ojciec - średniorolny, niepiśmienny chłop. Młody Isaac byłby skazany na życie na roli. Ale rodzina jego matki (o nazwisku Ayscough) stała wyżej na drabinie społecznej niż Newtonowie. Dziadek, James Ayscough, był szlachcicem, a matka Isaaca, Hannah, miała brata o imieniu William, który był absolwentem Trinity College w Cambridge i pastorem w pobliskiej parafii.

Newton miał samotne dzieciństwo - jego ojczym nigdy nie przyjął go do swego domu - ale uczęszczał do lokalnych szkół, otrzymał podstawowe wykształcenie i poznał świat od znacznie lepszej strony, niż byłoby to możliwe w wypadku chłopskiego syna. Gdy w 1653 roku zmarł jego ojczym, matka wróciła do Woolsthorpe i Isaac przeniósł się z powrotem do niej. Jego radość z powrotu przyćmiewał fakt, że musiał teraz dzielić uczucia matki z przyrodnim rodzeństwem - bratem i dwiema siostrami. Dwa lata później, w wieku 12 lat, został wysłany do szkoły średniej w Grantham, gdzie mieszkał w domu aptekarza o nazwisku Clark.

Osamotnienie i rozłąka z matką oraz fakt, że nigdy nie widział swego ojca, z pewnością przyczyniły się do ukształtowania przykrego charakteru Newtona - nie mającego cierpliwości do ludzi mniej obdarowanych intelektualnie, skrytego i kłótliwego, angażującego się w zażarte dysputy na temat pierwszeństwa odkryć i skorego do oskarżeń o plagiat. Mimo że dobrze radził sobie w szkole i był uważany za niezwykle inteligentnego (ale wyraźnie ekscentrycznego) ucznia, miał do pokonania jeszcze jedną przeszkodę, zanim ostatecznie trafił na drogę do naukowej chwały. Gdy

²⁰ Królewskie Towarzystwo [Naukowe] (przyp. tłum.).

²¹ Zgodnie z obowiązującym wtedy w Anglii kalendarzem. Na kontynencie - dzięki papieskiej reformie mającej uzgodnić kalendarz ze zmianami pór roku - był już dzień 4 stycznia 1643 roku.

miał 17 lat, matka sprowadziła go z powrotem na farmę, którą zamierzała mu przekazać. Okazał się jednak beznadziejnym gospodarzem. Podczas gdy Hannah rozpaczliwie próbowała uczynić z niego farmera, jej brat, William, nakłaniał ją, aby wysłała Isaaca z powrotem do szkoły, aby mógł przygotować się do studiów uniwersyteckich. Dyrektor szkoły w Grantham, o nazwisku Stokes, użył bardzo przekonującego argumentu, proponując, aby młody człowiek zamieszkał w jego domu, a także zaoferował zniżkę czesnego, żeby tylko odzyskać swego prymusa. W 1660 roku, tym samym, w którym Karol II odzyskał tron po jedenastoletnim parlamentarnym interregnum, Hannah uległa i Isaac powrócił do szkoły w Grantham, a w czerwcu 1661 roku przeniósł się do Cambridge. Od tego momentu nie było już odwrotu.

Oficjalny program nauczania w Cambridge był nadal, w latach sześćdziesiątych siedemnastego wieku, oparty na koncepcjach starożytnych Greków, a w szczególności Arystotelesa. Newton uczęszczał dosyć pilnie na wykłady i w 1665 roku ukończył studia, ale równocześnie studiował nową naukę siedemnastego stulecia, czytając prace bardziej współczesnych autorów, łącznie z Keplerem, Galileuszem i Kartezjuszem. Gdy w 1665 roku w Londynie wybuchła zaraza, uniwersytet w Cambridge został zamknięty i Newton powrócił do domu w Lincolnshire. Pozostał tam przez dwa kolejne lata, rozmyślając o tym, czego się nauczył, i rozwijając własne koncepcje funkcjonowania wszechświata. To właśnie w czasie tych dwóch lat wynalazł rachunek różniczkowy, opracował swoją teorię grawitacji oraz stworzył teorię światła i koloru. Przez wiele lat niczego jednak nie opublikował - wystarczyło mu rozwiązanie problemu dla własnej satysfakcji. Później jego koledzy mieli olbrzymie trudności z przekonaniem go, aby udostępnił wszystkim owoce swojej pracy (gdy już zdołali się przekonać, czego dokonał).

W latach sześćdziesiątych siedemnastego stulecia istniały dwie konkurencyjne teorie światła. Według jednej z nich, głoszonej przez francuskiego fizyka, Pierre'a Gassendiego (1592-1655), światło było strumieniem maleńkich cząstek, poruszających się z niewyobrażalnie dużą prędkością. Druga teoria, zaproponowana przez Kartezjusza, sugerowała, że nie ma jakiegokolwiek fizycznego ruchu światła z jednego miejsca do innego, lecz wszechświat jest wypełniony pewnego rodzaju materiałem (nazwanym „plenem”), który wywiera ciśnienie na gałki oczne. Ciśnienie to, zwane też „skłonnością do ruchu”, miałyby być odpowiedzialne za zjawisko widzenia. Jasne przedmioty, takie jak Słońce, miałyby być rozpierane przez wewnętrzne ciśnienie, a nacisk byłby przenoszony przez plenum i odczuwany przez ludzkie oko skierowane w stronę przedmiotu.

Obie koncepcje miały słabe strony. Jeżeli światło jest strumieniem cząstek, to co się dzieje, gdy dwie osoby stoją twarzą do siebie i patrzą sobie prosto w oczy? A jeżeli zmysł wzroku działa dzięki ciśnieniu plenum na gałki oczne, to (jak zapisał w swoich notatkach Newton) w nocy osoba biegnąca powinna widzieć, gdyż jej ruch spowodowałby nacisk plenum na oczy.

Newton opowiadał się za korpuskularną koncepcją światła (zgodnie z którą światło jest strumieniem cząstek) nie tylko dlatego, że jego własne prawa mechaniki tak skutecznie wyjaśniły ruchy ciał. Sądził, że będzie możliwe użycie tych samych praw fizyki do opisu ruchu planet wokół

Słońca, trajektorii pocisków armatnich lub zachowania cząstek światła. W pewnym sensie próbował stworzyć zunifikowaną teorię fizyki, o ponad 300 lat wyprzedzając swoje czasy. W 1661 roku, gdy Newton przeniósł się do Cambridge, konkurencyjna teoria Kartezjusza zaczęła jednak przedstawiać się bardziej obiecująco.

W oryginalnej wersji swojej teorii Kartezjusz wyobrażał sobie światło jako stałe ciśnienie wywierane na oczy. Stąd był już tylko mały krok do koncepcji, w której pojawiło się pulsujące ciśnienie rozchodzące się wokół jasnego przedmiotu. Te drgania tworzyłyby fale - niezupełnie takie, jak fale na powierzchni jeziora, lecz raczej jak wibracje ciśnienia, które rozchodzą się w głąb wody, gdy o powierzchnię uderza się dłonią (obecnie wiemy, że dokładnie w taki sposób rozchodzi się dźwięk). Na początku lat sześćdziesiątych siedemnastego wieku przynajmniej dwóch ludzi, Robert Hooke w Anglii i Christiaan Huygens w Holandii, pracowało nad całościową teorią światła opartą na koncepcji falowej.

O Hooke'u wspomnimy nieco później. Huygens zasługuje na więcej niż przelotną wzmiankę, gdyż spośród wielkich fizyków swoich czasów ustępuje tylko Newtonowi, co stanowi nie byle jakie osiągnięcie, zważywszy, że Newton jest nadal uważany za najwybitniejszego naukowca wszech czasów.

W cieniu Newtona

Huygens urodził się w 1629 roku w Hadze, w rodzinie o zasadniczo odmiennych tradycjach od Newtonów. Jego ojciec był dyplomatą i poetą; pochodził z rodziny pozostającej od kilku pokoleń w służbie dyplomatycznej dynastii orańskiej. Kartezjusz, który w młodości służył w armii księcia Orańskiego i mieszkał w Holandii od 1628 do 1649 roku, był częstym gościem w domu Huygensów, co mogło być jednym z czynników decydujących o wyborze kariery przez młodego Christiaana. Huygens odebrał staranne wykształcenie w dziedzinie matematyki i prawa i jego przeznaczeniem była kariera dyplomatyczna, ale w 1649 roku, po zakończeniu formalnej edukacji, powrócił do domu i następane szesnaście lat spędził jako naukowiec amator, żyjąc z pieniędzy otrzymywanych od ojca.

Mając tak uprzywilejowaną pozycję społeczną i przyzwolenie rodziny na zaspokajanie swoich kaprysów, Huygens łatwo mógł stać się dyletantem, zabawiającym się studiowaniem natury. Był on jednak głęboko zainteresowany wieloma obszarami nauki i jego dokonania w różnych dziedzinach były tak znaczne i tak szeroko znane, że gdy w 1666 roku została założona we Francji Królewska Akademia Nauk, Huygens został do niej zaproszony jako jeden z siedmiu członków założycieli. Przebywał we Francji do 1681 roku, kiedy to został zmuszony do powrotu do Holandii - częściowo ze względu na słabe zdrowie, a częściowo wskutek obaw przed prześladowaniami za swoje protestanckie przekonania w katolickiej Francji. Od czasu do czasu podróżował za granicę, między innymi do Londynu w 1689 roku, gdzie poznał Isaaca Newtona. Zmarł w 1695 roku w Hadze.

Pod jednym względem Huygens był podobny do Newtona - często opóźniał publikacje swoich idei. W jego wypadku przyczyną była pedantyczna i obsesyjna perfekcyjność, z jaką cyzelował wszystkie swoje prace, zanim ukazały się w druku. To przywiązanie do szczegółów bardzo mu się

przydało, gdy pracował nad zegarem wahadłowym, swoim pierwszym wielkim wkładem w rozwój siedemnastowiecznej nauki.

Już w 1581 roku Galileusz odkrył, że wahadło zachowuje regularny rytm niezależnie od wielkości wychylenia, ale nikomu nie udało się wykorzystać tej regularności do skonstruowania dokładnego zegara, dopóki w 1650 roku Huygens nie stworzył pierwszego praktycznego projektu. Pierwszy zegar zbudowany na podstawie tego projektu powstał w 1657 roku, a już w rok później zegary wahadłowe na wieżach kościelnych były powszechnym elementem krajobrazu Holandii. Odkrycie to przekształciło naukę, dając jej narzędzie do dokładnego pomiaru czasu, co stanowiło kluczowy warunek sukcesu w pomiarach Romera, a także w wielu innych dziedzinach astronomii. Huygens poszedł jeszcze dalej i w 1674 roku skonstruował pierwszy działający zegarek, napędzany przez sprężynę i kontrolowany nie przez wiszące, lecz przez wirujące wahadło (Hooke również wpadł na ten sam pomysł, niezależnie od Huygensa, ale ten ostatni był autorem pierwszego działającego modelu).

Huygens projektował także teleskopy i wykonywał obserwacje astronomiczne. W 1655 roku odkrył Tytana, największy księżyc Saturna, a także jako pierwszy poprawnie opisał naturę pierścieni Saturna. Przez obserwacje astronomiczne oraz dążenie do skonstruowania coraz lepszych teleskopów Huygens zainteresował się naturą światła, co doprowadziło do jego największego osiągnięcia - kompletnej falowej teorii światła, która była gotowa już w 1678 roku, ale została w całości opublikowana dopiero w 1690. Teoria ta wyjaśniała odbicie od lustra, a także refrakcję - ugięcie, jakiemu światło ulega przy przejściu z powietrza do wody lub szkła. Opierając się na koncepcji Kartezjusza, Huygens wyobrażał sobie światło jako swego rodzaju ruch cząstek, rozpychających się i potracających nawzajem i w ten sposób rozprzestrzeniających zaburzenie jako sferyczną falę ciśnieniową rozchodzącą się wokół źródła. Jedno z przewidywań tej teorii było szczególnie znaczące: aby mogła ona wytłumaczyć zjawisko refrakcji, światło powinno poruszać się w gęstszym ośrodku (takim jak szkło lub woda) wolniej niż w rzadszym (takim jak powietrze).

Pech Huygensa polegał na tym, że mimo swoich osiągnięć pozostawał zawsze w cieniu Newtona. Oszalałmiające osiągnięcia Newtona z dziedziny „filozofii naturalnej” - jego prawa ruchu i teoria grawitacji - zostały opublikowane w 1687 roku jako słynne *Principia*. Niektóre z koncepcji Newtona na temat światła ukazały się w druku piętnaście lat wcześniej, lecz kompletna teoria została opublikowana dopiero w 1704 roku - z powodów, które staną się jasne poniżej. Dzięki zasłużonej reputacji Newtona jako największego geniusza nauki jego koncepcje na temat światła były, podobnie jak prawa ruchu i teoria grawitacji, traktowane w osiemnastym wieku jak ewangelia. Poglądy Newtona na światło opierały się na założeniu, że jest ono strumieniem cząstek, toteż dla każdego było oczywiste, że teoria Huygensa musi być błędna. Jednak nawet geniusze popełniają czasami pomyłki. W gruncie rzeczy hipoteza korpuskularna nie była najważniejszym aspektem Newtonowskiej teorii światła. Osiągnięciem Newtona, które po raz pierwszy zwróciło na niego uwagę ówczesnego świata nauki, była teoria koloru. Podobnie jak w wypadku Huygensa, teoria Newtona także wiązała się z astronomią.

Newtona pogląd na wszechświat

Teoria koloru Newtona jest ważna nie tylko dlatego, że do dzisiaj uchodzi za słuszną, ale także ze względu na sposób, w jaki Newton do niej doszedł. Upřednio filozofowie formułowali koncepcje o naturze i o świecie głównie za pomocą czysto teoretycznych rozważań. Kartezjusz wiele myślał o tym, w jaki sposób światło mogłoby być transmitowane od jasnego przedmiotu do oka, ale nie wykonał żadnych eksperymentów, aby zweryfikować swoje hipotezy. Newton nie był oczywiście pierwszym eksperymentatorem - wcześniej między innymi Galileusz uTORował drogę doświadczeniu swymi badaniami nad staczaniem się kul z równi pochyłej, a także nad wahadłami. Newton był jednak pierwszym uczonym, który w jasny sposób sformułowal podstawy naukowej metody badawczej - połączenia idei (hipotez), obserwacji i eksperymentu - która stała się kanonem nowoczesnej nauki.

Newton stworzył teorię koloru na podstawie eksperymentów wykonanych w czasie przymusowego urlopu z uniwersytetu Cambridge. W 1665 roku dobrze znany był fakt, że promień światła można przekształcić w tęczowe widmo kolorów, przepuszczając go przez trójkątny szklany pryzmat. Standardowe wyjaśnienie tego efektu opierało się na arystotelesowskiej idei, zgodnie z którą białe światło stanowi czystą, nieskażoną formę światła, a przepuszczenie go przez szkło powoduje jego zepsucie. Gdy światło wnika do pryzmatu, ulega ugięciu, a następnie podąża wzdłuż linii prostej w kierunku drugiej ściany, gdzie ponownie ulega ugięciu, wracając do powietrza. Ponadto z pojedynczej plamki świetlnej powstaje kolorowa wstęga. Najmniej ugięta część światła przechodzi - po najkrótszej drodze - najbliższej wierzchołka pryzmatu i wyłania się jako czerwona część widma. Im dalej od wierzchołka pryzmatu, tym jest on szerszy, więc najbardziej ugięty promień fioletowy pokonuje najdłuższą drogę wewnątrz pryzmatu. Każdy kolor tęczy - czerwony, pomarańczowy, żółty, zielony, niebieski, indygo i fioletowy - pojawia się w innym miejscu, gdyż odpowiadający mu promień biegnie po nieco innej drodze. Jeśli w zaciemnionym pokoju zrobi się mały otwór w zasłonie okiennej (podobnie jak w przypadku *camera obscura*) i na drodze wpadającego przezeń promienia słonecznego ustawi się pryzmat, na ścianie naprzeciwko okna pojawi się tęczowa wstęga.

Zgodnie z poglądem Arystotelesa ta część białego światła, która przeszła przez pryzmat po najkrótszej drodze, uległa najmniejszej modyfikacji i stała się światłem czerwonym. Ta część, która pokonała nieco większy dystans, uległa nieco większej modyfikacji i stała się żółta - i tak dalej, aż do fioletu.

Newton weryfikował te koncepcje, używając pryzmatów i soczewek, które własnoręcznie szlifował, próbując za pomocą soczewek o różnych kształtach zminimalizować zmianę koloru. Był on pierwszym badaczem, który wyróżnił promienie o różnych kolorach i nadał im nazwy (celowo podzielił widmo na siedem kolorów, ponieważ liczbie siedem przypisywano mistyczne właściwości; jeżeli czytelnik ma trudności z rozróżnieniem koloru „indygo” pomiędzy niebieskim i fioletem, to nie jest w tym osamotniony!).

Jednak najważniejszy eksperyment wykonany wówczas przez Newtona polegał po prostu na ustawieniu drugiego pryzmatu za pierwszym, ale wierzchołkiem w dół. Pierwszy pryzmat, ustawiony wierzchołkiem do góry, rozszczylił białe światło na tęcze widmo. Drugi, ustawiony wierzchołkiem w dół, połączył rozszczyliłone kolory z powrotem w białą plamę światła. Mimo że światło przeszło przez dodatkową warstwę szkła, nie uległo jeszcze większemu skażeniu, lecz powróciło do swej pierwotnej czystości.

Newton zdał sobie sprawę, że białe światło nie jest wcale „czyste”, lecz stanowi mieszaninę wszystkich kolorów tęczy. Różne kolory uginają się w różnym stopniu w procesie załamania światła, ale wszystkie one są obecne w początkowym, nie rozszczyliłonym promieniu. Była to rewolucyjna teza, zarówno ze względu na to, że kwestionowała podstawowy dogmat teorii Arystotelesa, jak i dlatego, że opierała się na solidnym fundamencie doświadczalnym. Newton nie spieszył się jednak z ogłoszeniem światu swego odkrycia (dokonanego w 1665 roku), lecz wykorzystał je do konstrukcji nowego typu teleskopu.

Jednym z problemów związanych z zastosowaniem dużych soczewek do budowy teleskopów (tak zwanych teleskopów refrakcyjnych) są efekty związane z faktem, że soczewki te mają tendencję do rozszczyliłania białego światła, co powoduje powstawanie kolorowych plam i pogarsza jakość obrazu. Zjawisko to nosi nazwę aberracji chromatycznej i jest szczególnie uciążliwe przy obserwacji gwiazd. Newton zdał sobie sprawę, że skonstruowanie układu soczewek pozbawionego tej wady byłoby niezwykle trudne (trudne, ale nie niemożliwe - istnieją tak zwane soczewki achromatyczne, zbudowane z dwóch lub więcej warstw szkła o różnych właściwościach refrakcyjnych, które są niemal całkowicie wolne od aberracji chromatycznej). Aby uniknąć tego problemu, zaprojektował i zbudował teleskop wykorzystujący zamiast soczewki zakrzywione lustro - tak zwany teleskop zwierciadlany.

W teleskopie Newtona światło odbija się od dużego zakrzywionego lustra umieszczonego w tylnej części tubusu, a następnie pada na małe płaskie lustro, ustawione pod kątem 45 stopni, dzięki czemu odbija ono promienie światła w kierunku małego otworu w bocznej ścianie teleskopu. Obserwacja gwiazd polega na patrzeniu przez ten mały otwór, dzięki czemu głowa obserwatora nie zasłania światła biegnącego w kierunku dużego lustra. Pomysł był genialny w swej prostocie, ale wykonanie dokładnego lustra za pomocą dostępnych wówczas materiałów okazało się bardzo pracochłonnym zadaniem, które Newton, ekspert od prototypów, wykonał własnoręcznie. W rezultacie powstał instrument o długości około 20 cm, dający dziewięciokrotnie większy obraz niż czterokrotnie dłuższy teleskop refrakcyjny - a ponadto pozbawiony aberracji chromatycznej.

Gdy zmalowało zagrożenie epidemią, uniwersytet został ponownie otwarty i Newton wrócił do Cambridge. W 1667 roku został wybrany na członka Trinity College. W tym czasie Anglia pozostawała w stanie wojny z Holandią. W 1667 roku Holendrzy skutecznie zaatakowali angielską flotę na Tamizie. Odgłos armatnich strzałów był dobrze słyszalny w Cambridge i wszyscy znali jego przyczynę. Newton zaimponował swoim kolegom, orzekając (jak się później okazało - słusznie), że

Holendrzy wygrali bitwę. Newton oparł swój wniosek na fakcie, że odgłos dział był coraz głośniejszy, co wskazywało, że bitwa się przybliżyła, czyli że Anglicy są w odwrocie.

W ciągu kilku następnych lat Newton stał się znany w kręgach akademickich, także poza Cambridge, dzięki swoim pracom z matematyki. W 1669 roku zrezygnował ze stanowiska pierwszego szefa katedry Lucasa, profesor matematyki, Isaac Barrow (mianowany w 1663 roku). Barrow był uznanym matematykiem, ale jego ambicje sięgały gdzie indziej - wkrótce potem został pierwszym kapelanem króla, a następnie przełożonym Trinity College. W gruncie rzeczy zrezygnował na rzecz Newtona, gdyż jego wpływ na wykonawców testamentu Henry'ego Lucasa był wystarczająco duży, aby zagwarantować, że jego następcą będzie inny członek Trinity, który właśnie dał się poznać jako zdolny matematyk.

Nominacja zapewniła Newtonowi stałą pozycję w Cambridge, lecz wymagała od niego regularnego wygłaszania cyklu wykładów. Jako temat pierwszego wykładu wybrał nie matematykę, lecz optykę oraz teorię koloru, ze szczególnym uwzględnieniem problemu aberracji chromatycznej w konstrukcji teleskopów. W tym samym czasie z dumą demonstrował kolegom w Cambridge i w okolicach swój teleskop. Najstarszy zachowany list Newtona (adresata nie znamy), z lutego 1669 roku, jest w gruncie rzeczy opisem teleskopu.

Wieści o tym niezwykłym instrumencie dotarły do Royal Society (które zostało formalnie utworzone w 1662 roku, ale nieformalnie istniało od roku 1645) pod koniec 1671 roku. Na prośbę sekretarza Royal Society, Henry'ego Oldenburga, Barrow w imieniu Newtona zawiązał teleskop do Londynu. W styczniu 1672 roku Oldenburg napisał do Newtona pełen pochlebstw list, w którym przekazał wyrazy uznania w imieniu Royal Society oraz wspomniał, że wiadomość o wynalazku została przekazana przebywającemu wówczas w Paryżu Huygensowi, dzięki czemu sława Newtona dotarła na kontynent. 11 stycznia 1672 roku Newton został wybrany na członka Royal Society, a kilka tygodni później wydrukowana została jego pierwsza praca z fizyki, w której przedstawił swoją teorię koloru. Ukazała się 19 lutego 1672 roku - w formie listu do Oldenburga - w wydawanych przez Royal Society „Philosophical Transactions” i stała się przyczyną pierwszego spośród słynnych naukowych sporów Newtona.

Robert Hooke (1635-1703) pełnił w owym czasie funkcję szefa eksperymentatorów²² w Royal Society. Był on znaną osobistością w świecie nauki, miał odmienny od Newtona pogląd na teorię światła i koloru (Jego teoria światła, mniej pełna niż Huygensa, została opublikowana w 1665 roku) i zawsze chętnie rościł sobie prawo do pierwszeństwa swoich prac. Na list Newtona odpowiedział w protekcyjnym tonie, odrzucając przypuszczenie, że światło mogłoby być strumieniem cząstek. Lekceważąc fakt, że teoria koloru Newtona nie opierała się na hipotezie korpuskularnej, Hooke w zjadliwy sposób dał do zrozumienia, że to, co w teorii Newtona jest oryginalne - jest błędne, a to, co jest poprawne - nie jest oryginalne.

²² W oryginale: *Curator of Experiments* (przyp. tłum.).

Wynikły stąd spór miał dwa skutki. Po pierwsze, spowodował wycofanie się Newtona ze świata nauki. Newton zamknął się w Cambridge i przez wiele lat odmawiał publikowania czegokolwiek (swoją teorię optyki trzymał w szufladzie aż do śmierci Hooke'a, a opublikował ją w całości dopiero wtedy, gdy miał pewność, że ostatnie słowo będzie należeć do niego). Po drugie, wywołał słynną uwagę Newtona: „Widziałem dalej, gdyż stałem na ramionach gigantów” - złośliwą aluzję do niskiego wzrostu Hooke'a, a zarazem do poziomu jego inteligencji²³.

W korespondencji z innym krytykiem teorii koloru, francuskim jezuitą o nazwisku Ignace Gaston Pardies, Newton opisał swoją metodę pracy, która stała się kanonem metody naukowej. W napisanym z Paryża liście, chociaż poczynił wiele uwag na temat teorii, Pardies odniósł się do Newtona z dostatecznym szacunkiem, co miało ten skutek, że Newton nie uznał autora listu za głupca, lecz odpisał mu, wyjaśniając szczegółowo swoje argumenty, a zarazem stwierdzając:

Wydaje się, że najlepsza i najbezpieczniejsza metoda filozofowania polega przede wszystkim na pracowitym badaniu właściwości rzeczy, ustaleniu tych właściwości przez eksperymenty, a następnie poszukiwaniu wyjaśniających je hipotez. Hipotezy powinny być formułowane wyłącznie w celu wyjaśniania właściwości rzeczy, a nie założone przy ich ustalaniu - oraz w celu dostarczania eksperymentów²⁴.

Trudno o lepszą definicję nauki. Niezależnie od tego, jak piękna jest teoria, nie może być prawdziwa, jeżeli nie zgadza się z wynikami eksperymentów. Dla przykładu - teoria światła Newtona (być może powinniśmy powiedzieć „hipoteza”, mimo że Newton złościł się, gdy Hooke użył tego określenia) wyjaśnia załamanie światła jako skutek zmiany jego prędkości przy przejściu z jednego ośrodka do drugiego. W odróżnieniu od teorii Huygensa teoria korpuskularna wymaga, aby światło poruszało się *s z y b c i e j* w gęstszym ośrodku, co daje nam doskonałą sposobność do sprawdzenia, która teoria jest prawdziwa. Gdyby Newton żył w czasach, gdy eksperymentalnie wykazano, że światło rzeczywiście porusza się wolniej w gęstszym ośrodku, to z pewnością uznałby to za dowód, że światło jest falą.

Niezależnie od opracowania naukowej metody badania świata Newton (a także Huygens i inni uczeni owej epoki) sformułował pierwszy paradygmat naukowy, czy też model rzeczywistości fizycznej. Zakłada on, że wszechświat podlega ścisłym regułom, lub prawom, i że zdarzenia tak różne, jak ruch planet wokół Słońca i ugięcie promienia światła mogą być wyjaśnione za pomocą tych samych praw, a nie jako zachcianki kapryśnych bogów.

Obraz wszechświata, jaki pozostawili nam giganci siedemnastowiecznej nauki, jest często (i słusznie) określany mianem „mechanizmu zegarowego”²⁵, podlegającego nieubłaganym prawom

²³ Uwaga o gigantach nie ma nic wspólnego z teorią grawitacji Newtona, gdyż pochodzi z listu do Hooke'a napisanego w 1675 roku, dwanaście lat przed opublikowaniem *Principiów*. Szczegóły sporu z Hookiem - por. J. Gribbin, *In Search of the Edge of Time*, rozdz. 1.

²⁴ Cytowane za: R. Westfall, *Never at Rest*, s. 242.

²⁵ W oryginale: *clockwork Universe* (przyp. tłum.).

przyrody. Obraz ten nie powinien jednak kojarzyć się z odmierzającym miarowo sekundy nowoczesnym budzikiem czy zegarkiem, lecz raczej z olbrzymim zegarem na wieży siedemnastowiecznej katedry, napędzanym, zgodnie z projektem Huygensa, przez olbrzymie wahadło wraz z licznymi przekładniami i kołami zębatymi, które nie tylko odliczają upływający czas, ale także o określonych godzinach poruszają skomplikowany układ tarcz, figur, dzwonów i innych mechanizmów. Taki mechaniczny model stworzyła siedemnastowieczna nauka, aby wyjaśnić taniec planet wokół Słońca i inne zjawiska przyrody.

Spuścizna Newtona łączy dwie koncepcje. Po pierwsze, zachowanie wszystkiego we wszechświecie jest przewidywalne, podobnie jak ruchy figur na tarczach kościelnych zegarów. Po drugie, do zrozumienia funkcjonowania wszechświata w zupełności wystarczy znajomość względnie prostych praw - dostatecznie prostych, aby umysł ludzki był w stanie je pojąć. W świetle tych osiągnięć błędnie fakt, że następny krok w zrozumieniu natury światła wydaje się wskazywać, iż korpuskularna teoria Newtona była błędna. Mimo wszystko był to istotny krok.

Pomysły Younga

Bezpośrednie dowody na falową naturę światła istniały już w czasach Newtona, ale były mało znaczące, prawie nie znane, a ich wyjaśnienie było raczej niekompletne. Pochodziły z prac włoskiego fizyka, Francesca Grimaldiego (1618-1663), który, podobnie jak Newton, badał zachowanie wiązki światła słonecznego wpuszczonego do zaciemnionego pokoju przez mały otwór. Zauważył on, że gdy promień przejdzie przez drugi mały otwór, to plamka na ekranie będzie nieco większa niż otwór i będzie miała kolorowe brzegi. Przy przejściu przez mały otwór światło nieznacznie się ugina, a różne kolory uginają się w różnym stopniu.

Grimaldi dostrzegł także kolorowe plamy na obrzeżach cienia, który powstaje, gdy na drodze światła ustawi się małą przeszkodę. Światło przecieka do wewnątrz cienia i znowu różne kolory uginają się w różnym stopniu. Oba efekty są bardzo słabe, lecz przy dostatecznie uważnej obserwacji mogą być dostrzeżone. Grimaldi nadał tej rodzinie zjawisk nazwę dyfrakcji. Jest to trzeci, oprócz odbicia i załamania, sposób, w jaki światło może zostać ugięte. Prace Grimaldiego zostały opublikowane dopiero w 1665 roku, w dwa lata po jego śmierci. Gdy idee Newtona zaważadnęły wyobraźnię społeczności naukowej, Grimaldi już nie żył i nie mógł bronić teorii falowej. Również Hooke odkrył, że światło nie porusza się po idealnie prostych liniach, lecz ugina się w kierunku cienia utworzonego przez przedmiot ustawiony na drodze światła. Znamy już przyczynę, dla której Hooke'a także nie było już na świecie, gdy Newton opublikował swoją teorię optyki.

Mimo że koncepcje Newtona zdominowały osiemnastowieczny świat nauki, falowa teoria światła miała swoich nielicznych zwolenników. Najbardziej znanym z nich był urodzony w 1707 roku w Bazylei Leonhard Euler, który miał niespełna dwadzieścia lat, gdy w 1727 roku zmarł Newton. Euler był jednym z najwybitniejszych matematyków wszech czasów. Interesował się zarówno czystą matematyką, jak i jej praktycznymi zastosowaniami w badaniach prądów pływowych, mechaniki płynów, przewidywaniach ruchów ciał niebieskich na podstawie praw Newtona i w wielu innych dziedzinach. Nawet wielcy uczeni popełniają czasem głupie błędy. Euler

stracił wzrok w prawym oku w wyniku spoglądania bezpośrednio na Słońce w czasie obserwacji astronomicznych, gdy był profesorem matematyki w Petersburgu. Trzydzieści lat później, gdy ponownie pracował w Petersburgu - jako dyrektor Akademii Nauk w czasach Katarzyny Wielkiej - stracił drugie oko na skutek katarakty. Mimo to pozostał na stanowisku, pełniąc nadal wszystkie swoje obowiązki aż do śmierci w 1783 roku. W ciągu ostatnich piętnastu lat swojego życia pracował aktywnie jako matematyk, wykonując wszystkie obliczenia w pamięci i dyktując asystentowi swoje odkrycia. W dniu śmierci, w wieku 76 lat, zajmował się obliczeniami praw ruchu dla wynalezionej w owym czasie balonu na gorące powietrze.

Euler opublikował swoją teorię światła w 1746 roku, w przerwie między dwoma pobytami w Petersburgu, gdy pracował w Akademii Nauk w Berlinie za panowania Fryderyka Wielkiego. W swojej publikacji zwrócił uwagę na wszystkie trudności związane z koncepcją korpuskularną (łącznie ze zjawiskiem dyfrakcji, które trudno wytłumaczyć przy założeniu, że światło jest strumieniem maleńkich cząstek), a także na analogię między drgającą falą świetlną a dźwiękiem. Na ośrodek, który jest nośnikiem tych drgań, w czasach Eulera nie mówiono już „plenum”, lecz „eter”. W liście napisanym w latach sześćdziesiątych osiemnastego wieku Euler stwierdził, że światło słoneczne jest „w stosunku do eteru tym, czym dźwięk w stosunku do powietrza”, a Słońce określił jako „dzwon dzwoniący światłem”²⁶. Jednak świat wciąż nie dawał się przekonać. Jest bardzo charakterystyczne, że teoria falowa wyparła korpuskularną dopiero wtedy, gdy przeprowadzone zostały nowe eksperymenty weryfikujące jej prawdziwość. Korpuskularną teorię światła Newtona została odrzucona w wyniku bezpośredniego zastosowania newtonowskiego paradygmatu prowadzenia badań naukowych.

Pierwszy krok wykonał urodzony w 1773 roku brytyjski fizyk, Thomas Young, który miał zaledwie 10 lat, gdy zmarł Euler. Jego młody wiek z pozoru nie ma znaczenia, ale Young był naprawdę cudownym dzieckiem, które w ciągu pierwszych dziesięciu lat życia osiągnęło więcej niż wielu ludzi w ciągu całego życia. W wieku 2 lat potrafił czytać po angielsku i pochłaniał książki podsuwane mu przez troskliwego dziadka. W wieku 6 lat opanował łacinę. Zanim ukończył 16 lat, rozumiał łacinę, grekę, francuski, włoski, hebrajski, Chaldejski, syryjski, samaryjski, arabski, perski, turecki i etiopski. Jak sugeruje powyższa lista, Young od wczesnych lat pasjonował się archeologią i historią starożytną, lecz w gruncie rzeczy interesowało go niemal wszystko. W 1792 roku, w wieku 19 lat, zaczął studia medyczne, zamierzając dołączyć do praktykującego w Londynie bogatego wuja. Studiował w Londynie, Edynburgu i Getyndze, gdzie w 1796 roku uzyskał tytuł doktora medycyny. W czasie pierwszego roku studiów Young odkrył, że mechanizm ogniskujący w oku działa dzięki mięśniom, które zmieniają kształt soczewki. W wyniku tego odkrycia został wybrany na członka Royal Society - miał wtedy 21 lat i nadal był studentem.

Po ukończeniu studiów Young podróżował po Niemczech, następnie przez dwa lata pracował w Cambridge, prowadząc rozmaite badania naukowe i - dzięki swojej wszechstronności - zyskując

²⁶ Cytowane za: A. Zajonc, *Catching the Light*, s. 99.

przydomek „Young fenomen”²⁷. W 1800 roku powrócił do Londynu, aby otworzyć prywatną praktykę lekarską. Od roku 1811 aż do śmierci w 1829 roku pracował w szpitalu św. Jerzego w Londynie, lecz medycyna była tylko jednym z jego licznych zainteresowań.

Young wyjaśnił astygmatyzm jako skutek nieregularności krzywizny rogówki oka, pierwszy doszedł do wniosku, że odróżnianie przez oko kolorów jest wynikiem oddziaływania trzech podstawowych kolorów (czerwonego, zielonego i niebieskiego) na różne receptory oka, przeprowadził wiele ważnych prac z fizyki (to on dokonał pierwszych oszacowań rozmiarów cząsteczek chemicznych), a także był sekretarzem do spraw zagranicznych w Royal Society (przynajmniej niektóre ze znanych mu języków z pewnością okazały się przydatne). Po roku 1815 powrócił do swoich wczesnych zainteresowań historią starożytną, publikując prace z egiptologii i pomagając odcyfrować kamień z Rosetty, znaleziony w pobliżu ujścia Nilu w 1799 roku (prawdopodobnie to właśnie Young w decydującym stopniu przyczynił się do odcyfrowania znalezionych na kamieniu z Rosetty hieroglifów, lecz jego rola nie została doceniona, gdyż jego główna praca na ten temat została opublikowana jako anonimowy suplement do *Encyclopaedia Britannica* w 1819 roku). Jednak mimo tych i wielu innych osiągnięć Young pamiętany jest głównie dzięki swoim badaniom zjawiska interferencji światła.

Pierwsze eksperymenty interferencyjne wykonał jeszcze w czasie pobytu w Cambridge, w okresie od 1797 do 1799. Kontynuował je po powrocie do Londynu i na początku dziewiętnastego wieku przedstawił sceptycznej brytyjskiej społeczności naukowej dokładne i szczegółowe sprawozdanie z tych eksperymentów, przemawiające na korzyść falowej teorii światła. Young przeprowadził (a zarazem wymyślił) podstawowe doświadczenie interferencyjne (opisane w prologu do niniejszej książki) zarówno w wersji z okrągłymi otworami, jak i ze szczelinami. Co więcej, wytłumaczył wyniki niektórych eksperymentów Newtona w kategoriach falowej teorii światła. Doszedł do wniosku, że każdy kolor światła odpowiada innej długości fali, oraz że kąt, pod jakim światło ugina się w procesie dyfrakcji lub załamania, zależy od długości fali. Wiedząc o tym, wykorzystał dane Newtona do obliczenia długości fali - dla światła czerwonego otrzymał wartość $6,5 \times 10^{-7}$ m, a dla fioletu $4,4 \times 10^{-7}$ m. Obie liczby zgadzają się z obecnymi wynikami, co dobrze świadczy o Youngu jako teoretyku i o Newtonie jako eksperymentatorze. Staje się zarazem zrozumiałe, dlaczego tak długo dochodzono do wniosku, że światło porusza się jak fala. Te długości fal są niezwykle małe - około połowy milionowej części metra - a rozmiary struktur dyfrakcyjnych są, z grubsza biorąc, porównywalne z długością fali, która ulega ugięciu. Gdy przechodzi ona w pobliżu krawędzi jakiegoś przedmiotu, to ugina się zaledwie o kilka milionowych części metra. Lecz tylko fale, jakkolwiek małe, mogą wytłumaczyć to, co się dzieje w eksperymencie z dwiema szczelinami.

W 1807 roku, zaledwie 80 lat po śmierci Newtona, Young tak oto podsumował wyniki tego eksperymentu:

²⁷ Gra słów. W oryginale: *Young phenomenon*. Angielskie słowo *young* znaczy „młody”, natomiast *phenomenon* to „fenomen” lub „zjawisko” (przyp. tłum.).

Środek [obrazu interferencyjnego] jest zawsze jasny, a jasne prążki po obu stronach znajdują się w takich odległościach, że padające na nie światło, biegnące w ich kierunku od jednej ze szczelin, musi pokonać dłuższą drogę niż to, które biegnie od drugiej szczeliny, a różnica tych dróg jest równa jednej, dwu, trzem lub większej liczbie wielokrotności postulowanych zafalowań [długości fali], podczas gdy ciemne obszary odpowiadają różnicy dróg równej połowie postulowanego zafalowania, półtora, dwu i pół lub więcej²⁸.

Dokładnie tak to się odbywa. Dziesięć lat później Young zasugerował, że światło jest falą poprzeczną (drżania mają kierunek poprzeczny w stosunku do kierunku rozchodzenia się fali), w odróżnieniu od fali podłużnej (dla której drżania zachodzą w tym samym kierunku, w którym fala się rozchodzi - tak jak w wypadku dźwięku lub „fal”, które powstają na przykład w miechu akordeonu).

Można przypuścić, że stanowi to dostateczny dowód na falową naturę światła. Nawet Young nie potrafił jednak przekonać współczesnych sobie przedstawicieli świata nauki, że Newton mylił się w tej kwestii. Niezależnie od powszechnego poczucia, że sugerowanie omylności Newtona w jakiegokolwiek sprawie ma w sobie coś niepatriotycznego, a nawet niegodnego, dla wielu kolegów Younga było niemal niewyobrażalne, że *d o d a j ą c* dwa promienie światła, można uzyskać ciemność. Dzisiaj jesteśmy dostatecznie oswojeni z tą koncepcją, a wyjaśnienie doświadczenia z dwiema szczelinami w kategoriach fal wydaje nam się całkowicie naturalne i zgodne ze zdrowym rozsądkiem, lecz w początkach dziewiętnastego wieku zdrowy rozsądek mówił, że dodanie dwóch promieni światła musi zawsze zwiększyć ich jasność. Koncepcja, zgodnie z którą dodanie dwóch promieni mogłoby dać ciemność, była - używając słów jednego ze współczesnych Youngowi uczonych - „jednym z najbardziej niezrozumiałych pomysłów, z którymi ludzkość miała do czynienia w swej historii”²⁹. Charakterystyczny zbieg okoliczności stanowi fakt, że ostateczny cios hipotezie korpuskularnej Newtona zadał Francuz, nieświadomy wcześniejszych prac Younga (czemu nie należy się dziwić, zważywszy, że Francja i Anglia były wówczas w stanie wojny, z wyjątkiem krótkiego okresu w latach 1799-1815).

Augustin Fresnel urodził się w 1788 roku w Broglie w Normandii. W 1809 roku uzyskał uprawnienia inżyniera, po czym objął rządową posadę związaną z konstrukcją dróg w rozmaitych rejonach Francji. Jego zainteresowanie optyką miało raczej hobbystyczny charakter i nie miał on żadnych znajomości wśród francuskich uczonych, którzy - mimo stanu wojny między Anglią a Francją - mogli być zaznajomieni z pracami Younga. Gdy Napoleon został pokonany i zesłany na Elbę, Fresnel „ujawnił” się jako rojalista, a w czasie Stu Dni Napoleona, w 1815 roku, zrezygnował z posady lub został z niej zwolniony (ta kwestia nie jest całkowicie jasna). Tak czy owak, skazano

²⁸ Cytowane za: R. Baierlein, *Newton to Einstein*, s. 95.

²⁹ Lord Henry Brougham, cytowane za: A. Zajonc, *Catching the Light*, s. 110.

go na areszt domowy w jego domu w Normandii, gdzie rozwinął swoje początkowe koncepcje na temat natury światła w całościową i spójną teorię.

Gdy Napoleon został ostatecznie obalony, Fresnel odzyskał posadę inżyniera, a optyka ponownie stała się jego hobby³⁰. W czasie wolnym od pracy zawodowej, a także w owym okresie wymuszonej bezczynności, zrobił dostatecznie wiele, aby korpuskularna teoria propagacji światła została ostatecznie odłożona do lamusa.

Fresnel, Poisson i plamka

Nie jest niczym zaskakującym, że Fresnel nie znał w 1815 roku prac Younga, dziwi natomiast fakt, że nie znał także prac Huygensa i Eulera. Jednak prawdopodobnie tak właśnie było. Teoria falowa Fresnela była w całości jego własnym dziełem. Powstała jako najprostsze wyjaśnienie zjawiska dyfrakcji. Kluczowy dowód pojawił się w wyniku eksperymentu, który pod pewnymi względami jest nawet nieco prostszy niż doświadczenie z dwiema szczelinami, aczkolwiek jeszcze bardziej zaskakuje.

Charakterystyczne prążki, powstające w wyniku dyfrakcji i interferencji, można w gruncie rzeczy zobaczyć za pomocą pojedynczej szczeliny - nie potrzeba dwóch szczelin ani żadnej skomplikowanej aparatury. Wystarczy podnieść dłoń na wysokość twarzy i spojrzeć przez szczelinę między palcami na jasne źródło światła. Stopniowo zbliżając do siebie palce, należy starać się maksymalnie zmniejszyć szerokość szczeliny. Tuż przed całkowitym jej zniknięciem pojawi się na jej tle układ ciemnych prążków. Może być tylko jeden lub dwa, ale jeśli się wytrwale i ostrożnie popróbuje, to powinno się zobaczyć ich więcej.

Fizycy robią to samo, stosując pojedynczą szczelinę i rzucając na ekran przechodzące przez nią światło. Wyjaśnienie tego zjawiska jest proste, aczkolwiek wymaga nieco rachunków. Najprościej można je wytłumaczyć, wyobrażając sobie światło uginające się na obu krawędziach pojedynczej szczeliny, a następnie biegnące w kierunku ekranu (lub oka) po dwóch odmiennych drogach, różniących się o pewną wielokrotność długości fali. Wspomniany powyżej kluczowy dowód, jaki uzyskał Fresnel, polega na odwróceniu doświadczenia z pojedynczą szczeliną, czyli na zastąpieniu małego otworu przez małą przeszkodę o tym samym kształcie, a następnie na obserwowaniu efektów interferencyjnych w obszarze cienia za przeszkodą, powstających w wyniku uginania się światła na skutek przejścia w pobliżu jej brzegów. Przypomina to nieco sposób, w jaki fale obmywające skałę zaburzają obszar wody za skałą (skala tego zjawiska zależy od stosunku rozmiarów skały i długości fali).

W 1817 roku, po ostatecznym zakończeniu wojen napoleońskich, francuska Akademia Nauk zdecydowała - częściowo pod wpływem prac Younga, ale prawdopodobnie nadal nic nie wiedząc o pracach Fresnela - podjąć próbę ostatecznego wyjaśnienia natury światła, oferując nagrodę dla

³⁰ Niektóre z jego ówczesnych prac znalazły praktyczne zastosowania. W 1820 roku Fresnel stworzył pewien rodzaj soczewki skonstruowanej z szeregu koncentrycznych kręgów. Soczewki tego typu, zwane dzisiaj soczewkami Fresnela, są używane między innymi do skupiania światła latarni morskich.

osoby, która wykona najlepsze doświadczenie badające zjawisko dyfrakcji oraz sformułuje teorię, która w zadowalający sposób wytłumaczy zachowanie światła w tym zjawisku. Aczkolwiek konkurs był otwarty dla przedstawicieli innych narodowości, nie tylko Francuzów, nadeszły jedynie dwie odpowiedzi. Jedna z nich była, zdaje się, całkowicie nedorzeczna. Nie zachowało się nawet nazwisko jej autora, nie mówiąc już o szczegółach proponowanego eksperymentu. Druga odpowiedź nadeszła od Fresnela, w charakterze wyczerpującej, liczącej 135 stron pracy. Jury spotkało się w marcu 1819 roku. Fresnel oczywiście zdobył nagrodę, aczkolwiek nie bez sprzeciwu niektórych jurorów. Do oponentów należeli matematyk Simeon Poisson, fizyk Jean Biot i astronom Pierre Laplace - zdecydowani zwolennicy teorii newtonowskiej.

Fresnel był niepoślednim matematykiem. Do opisu zachowania światła w rozmaitych sytuacjach dyfrakcyjnych zastosował matematyczny formalizm oparty na rachunku różniczkowym i całkowym, stworzonym przez Newtona i Gottfrieda Wilhelma Leibniza. Jednak równania były niekiedy tak skomplikowane, że nawet Fresnel nie zawsze potrafił rozwiązać je do końca, aby uzyskać dokładne szczegóły uginania się światła w rozmaitych sytuacjach. Poisson (1781-1840) był nie tylko zagorzałym zwolennikiem Newtona, ale zarazem zdolnym matematykiem. Zajmował się między innymi rachunkiem prawdopodobieństwa, rachunkiem różniczkowym i całkowym, elektrycznością i magnetyzmem - w tych i w wielu innych dziedzinach dokonał ważnych odkryć. Poisson zainteresował się jednym z przykładów podanych przez Fresnela, rozwiązał odpowiednie równania i zaprezentował pozostałym jurorom coś, co wydawało się dowodem przez *reductio ad absurdum*, i co miało raz na zawsze pogрузić teorię falową. Pogląd, że kolorowe plamy na granicach cienia mogą być wynikiem dyfrakcji fal świetlnych, był przynajmniej zgodny ze zdroworozsądkowymi wyobrażeniami o zachowaniu fal. Poisson pokazał jednak, że teoria Fresnela przewiduje pojawienie się maleńkiej jasnej plamki **d o k ł a d n i e** za małym okrągłym przedmiotem ustawionym na drodze promienia światła - dokładnie na środku cienia wytworzonego przez ten przedmiot. Fale świetlne uginające się wokół krawędzi przedmiotu powinny się dodawać, aby utworzyć tę jasną plamkę na środku cienia. Absurd! Poisson następująco opisał wyniki swoich obliczeń:

Umieścmy nieprzezroczysty krążek na drodze równoległych promieni światła, pozostały obszar będzie całkowicie przezroczysty. Za krążkiem powstaje cień - co jest oczywiste - lecz sam środek cienia jest jasny. Wzdłuż prostej stanowiącej oś krążka nie ma nigdzie ciemności (z wyjątkiem punktu bezpośrednio doń przylegającego). Co więcej, natężenie rośnie w sposób ciągły, począwszy od zera tuż za cienkim krążkiem. W odległości od krążka równej jego średnicy natężenie wynosi 80% wartości, jaką miałyby, gdyby krążka nie było. Dalej rośnie wolniej, ale zmierza do wartości 100%.

Jurorzy, wierni uczniowie Newtona, nie mieli bynajmniej zamiaru ograniczać się do logiki i zdrowego rozsądku, aby odrzucić teorię Fresnela. Stosując standardową już metodę sprawdzania hipotez przez eksperymentowanie, przewodniczący jury, Francois Arago, zorganizował przeprowadzenie odpowiedniego doświadczenia. Okazało się, że rzeczywiście dokładnie na

środku cienia znajduje się mała jasna plamka (znana do dzisiaj jako plamka Fresnela). Pojawia się ona w cieniu małych kulek, piłeczek, a także małych płaskich dysków. Fresnel miał rację, a Newton był w błędzie. W marcu 1819 roku Arago złożył sprawozdanie na posiedzeniu Rady Akademii Nauk, w którym napisał:

Jeden z członków komisji, pan Poisson, wydedukował z obliczeń całkowych przedstawionych przez autora [Fresnela] osobliwy rezultat: środek cienia nieprzezroczystego okrągłego ekranu musi być tak samo oświetlony - gdy promienie przedostają się tam pod nieznacznie ukośnymi kątami - jak wtedy, gdy ekranu by nie było. Wniosek ten został poddany bezpośredniemu sprawdzianowi doświadczalnemu, którego wynik całkowicie potwierdził obliczenia³¹.

To jest sedno sprawy. Teorie są dobre tylko wtedy, gdy rodzą się z eksperymentu, a to, co mówią nam wyniki eksperymentów, musi być „słuszne” i musi dać się włączyć do dobrej teorii. Niezależnie od tego, jak dziwaczne wydają nam się te wyniki - na przykład wspomniana w prologu dualna natura elektronów - nie można ich nie uwzględnić w teorii. Uznanie ze strony komisji konkursowej zagwarantowało oczywiście Fresnelowi nagrodę i sławę. Później pracował on wraz z Arago nad pewnymi aspektami teorii fal poprzecznych, które wyjaśniły nie rozwiązane dotąd zagadki związane z polaryzacją światła. Był to istotny krok naprzód w udowodnieniu, że fale świetlne rzeczywiście są poprzeczne. Fresnel zaproponował także eksperyment, w którym zmierzono prędkość światła w wodzie. Eksperyment ten został wykonany w 1850 roku i wykazał, że - zgodnie z przewidywaniami teorii falowej - w wodzie światło porusza się wolniej niż w powietrzu. Jednak w tym czasie nikt już nie potrzebował na to dowodów.

Fresnel został wybrany do Francuskiej Akademii Nauk w 1823 roku, a w 1827 został członkiem Royal Society. Wkrótce potem - sto lat po śmierci Newtona - zmarł na gruźlicę, w wieku zaledwie 39 lat. Young przeżył go o dwa lata i zmarł w 1829 roku, miesiąc przed 56 rocznicą swoich urodzin. Dwa lata później urodził się w Edynburgu człowiek, który ostatecznie wyjaśnił, jak porusza się światło. James Clerk Maxwell wytłumaczył naturę światła na podstawie teorii elektryczności i magnetyzmu oraz ich wzajemnego oddziaływania, teorii, które powstały w latach dwudziestych dziewiętnastego wieku - za życia Younga i Fresnela.

Uczeń introligatora

Urodzony w 1791 roku Michael Faraday był trzecim z czworga dzieci ubożego kowala z Newington w hrabstwie Surrey. Dzięki uporowi, zdolnościom i odrobinie szczęścia zdołał przezwyciężyć nie sprzyjające warunki rodzinne oraz brak formalnego wykształcenia i został największym eksperymentatorem dziewiętnastego stulecia. Rodzina Faradaya przeniosła się z

³¹ R. Bairelein, *Newton to Einstein*, s. 103; podkreślenie J.G.

Newington (które później zostało wchłonięte przez południowe dzielnice Londynu i obecnie należy do okręgu Southwark) do północnego Londynu. W wieku 13 lat Faraday zaczął pracować jako chłopiec na posyłki u księgarza i introligatora. Jego dotychczasowa edukacja nie dała mu w zasadzie żadnej znajomości matematyki, lecz przynajmniej umiał czytać, dzięki czemu - otoczony książkami - zaczął je pochłaniać jedną po drugiej. Jego pryncypał, francuski imigrant, który w obawie przed rewolucją uciekł przez kanał La Manche i schronił się w Anglii, zachęcał Michaela do lektury i do nauki. Faraday został przyjęty na czeladnika w warsztacie introligatorskim i w ciągu siedmiu lat pracy doskonale opanował to rzemiosło (co okazało się całkiem przydatne w jego dalszej karierze naukowca eksperymentatora). Czytał wszystko, co wpadło mu w ręce - szczególnie zafascynował go artykuł o elektryczności w *Encyclopaedia Britannica*.

W 1810 roku, w wieku 19 lat, Faraday został słuchaczem Miejskiego Towarzystwa Filozoficznego, regularnie uczęszczając na wykłady naukowe. Dzięki nim poznał podstawy fizyki i chemii, a także uczestniczył w pracach eksperymentalnych. W czasie wykładów robił szczegółowe, dokładne i staranne notatki, które własnoręcznie oprawiał. Powstała z tego seria woluminów, która stała się jego przepustką do kariery naukowej.

Szef Faradaya, M. Ribeau, z dumą pokazywał jego oprawione notatki klientom swojej księgarni. Jeden z nich, pod wrażeniem entuzjazmu Faradaya, umożliwił uczniowi introligatora uzyskanie wstępu do Royal Institution, gdzie wykładał sir Humphry Davy, najwybitniejszy angielski uczonego owych czasów (żył w latach 1778-1829), a zarazem doskonały wykładowca. Odkrył między innymi anestetyczne właściwości podtlenku azotu (tak zwanego gazu rozweselającego), a jego największym osiągnięciem był wynalazek bezpiecznej lampy górniczej, dzięki której zmalało ryzyko wybuchu gazu ziemnego w kopalniach węgla. Lampa Davy'ego stała się standardowym wyposażeniem w górnictwie.

Wykłady Davy'ego wzbudziły entuzjazm u zafascynowanego nauką Faradaya. W 1812 roku skończył się okres terminowania w pracowni introligatorskiej, lecz zamiast pozostać w zawodzie introligatora, Faraday postanowił szukać pracy związanej z nauką. Wyposażony we własnoręcznie oprawione notatki z wykładów Davy'ego, bezskutecznie poszukiwał jakiegokolwiek posady - nikt nie traktował poważnie naukowych ambicji bezrobotnego introligatora. Jedyne, co udało mu się osiągnąć, to kilkudniowe zajęcie w roli pomocnika Davy'ego, który oślepił w wyniku eksplozji w laboratorium. Faraday napisał do Davy'ego błagalny list z prośbą o stałą posadę, a także podarował mu oprawiony przez siebie tekst wykładów swego chwilowego chlebodawcy, który - przyszedłszy do zdrowia - okazał szczerą chęć pomocy. Niestety nawet protekcja przychylnie nastawionego Davy'ego nie pomogła - w Royal Institution nie było żadnych wolnych etatów.

Dopomógł szczęśliwy przypadek. Asystent Davy'ego został zwolniony z pracy za udział w bójce, a jego miejsce zaproponowano Faradayowi. 1 marca 1813 roku dwudziestoletni były introligator rozpoczął pracę w Royal Institution. Początki nie były łatwe. Davy pod wieloma względami nie był idealnym pracodawcą - był snobistyczny, zazdrosny, miał wybuchowy temperament i skłonność do lekceważenia pracy innych ludzi. W ciągu pierwszych trzech lat pracy

obowiązki Faradaya miały raczej mało kształcący charakter - pracował między innymi jako lokaj Davy'ego podczas długich podróży po Europie - a wynagrodzenie było mizerne (gwinea tygodniowo, mniej niż zarabiał jako introligator, oraz dwa pokoje na poddaszu Royal Institution), lecz dzięki tej posadzie spotykał wybitnych uczonych i obserwował jednego z nich na co dzień przy pracy. W 1816 roku Faraday zaczął publikować prace naukowe. W 1823 roku pierwszy skroplił kilka gazów (między innymi chlor), a w 1824 został wybrany na członka Royal Society (mimo sprzeciwu Davy'ego, który pełnił wówczas funkcję przewodniczącego zarządu). W 1825 roku odkrył benzen, wyodrębniając go z ropy naftowej. W tym samym roku został mianowany na dyrektora laboratorium w Royal Institution, a rok później rozpoczął regularne wykłady w piątkowe wieczory, których sława z biegiem czasu stała się jedną z najlepszych wizytówek nauki w wiktoriańskiej Anglii. Pod względem sukcesu i uznania Faraday wkrótce prześcignął Davy'ego, który z goryczą obserwował, jak osiągnięcia jego byłego protegowanego przyćmiewają jego własne. Davy zmarł jednak w 1829 roku, w stosunkowo młodym wieku. Przez ponad trzydzieści lat, aż do 1861 roku, gdy przeszedł na emeryturę i przeniósł się do podarowanego mu przez księcia Alberta domu w Hampton Court, Michael Faraday był niemal synonimem Royal Institution. Zmarł w 1867 roku, miesiąc przed 77 rocznicą urodzin. Był jedynym uczonym, który nie tylko odmówił przyjęcia tytułu szlacheckiego, lecz także (dwukrotnie!) funkcji przewodniczącego Royal Society. „Zawsze uważałem - powiedział - że nagrody za osiągnięcia intelektualne mają w sobie coś degradującego, i nie zmienia tego fakt, że przyznają je towarzystwa i akademie, a nawet królowie i cesarzowie”.

W ciągu swojej długiej kariery naukowej Faraday odniósł bardzo wiele sukcesów, lecz jego największe osiągnięcia stanowiły odkrycia związane z naturą elektryczności i magnetyzmu. Nie tylko utorowały one drogę do zrozumienia mechanizmu poruszania się światła, ale dały także fizyce koncepcję pola - paradygmat, który stał się kamieniem węgielnym współczesnych poglądów na mechanizm funkcjonowania wszechświata.

Pola Faradaya

Pierwsze poważne badania elektryczności i magnetyzmu Faraday prowadził już w roku 1821, w rok po tym, jak Hans Oersted w Kopenhadze odkrył zadziwiające zjawisko odchylenia igły kompasu przez prąd elektryczny płynący przez umieszczony w pobliżu przewodnik. Było jasne, że przepływ prądu wywołuje efekty magnetyczne. Andre Ampere, który użyczył swego nazwiska jednostce natężenia prądu, pokazał, że dwa równoległe przewodniki przyciągają się, jeżeli przez oba płynie prąd w tym samym kierunku, a odpychają, gdy kierunki przepływu prądu są przeciwne. Z kolei Francois Arago, którego już poznaliśmy, odkrył, że wirujący miedziany dysk powoduje odchylenie igły kompasu umieszczonej tuż nad jego powierzchnią.

Wydawca „Philosophical Magazine” poprosił Faradaya o zbadanie i wyjaśnienie czytelnikom tych tajemnic. Faraday wykonał wiele eksperymentów i doszedł do wniosku, że dookoła przewodu z prądem elektrycznym tworzą się kołowe „linie sił magnetycznych”. Zaprojektował i zbudował układ doświadczalny, w którym swobodnie zawieszony przewodnik z prądem porusza się wokół

unieruchomionego magnesu, a także inny układ, w którym swobodnie zawieszony magnes porusza się wokół unieruchomionego przewodnika z prądem. W obu wypadkach przyczyną ruchu jest siła magnetyczna, a zasada działania obu urządzeń stanowi podstawę konstrukcji silnika elektrycznego oraz (w rezultacie) dynama, czyli generatora elektryczności. Faraday rozumował, że jeżeli elektryczność może być źródłem magnetyzmu, to magnetyzm powinien generować elektryczność.

W 1831 roku udało mu się udowodnić tę hipotezę. Najprostszym przykładem indukcji elektromagnetycznej Faradaya jest eksperyment, w którym zwykły magnes wkłada się lub wyjmuje z cewki elektrycznej. Gdy magnes się poruszy, w cewce powstaje prąd elektryczny. Faraday wykazał, że elektryczność w ruchu generuje magnetyzm, a także, że magnetyzm w ruchu generuje elektryczność. Kluczowe w tym kontekście jest słowo ruch. Opóźnienie w odkryciu drugiego z powyższych zjawisk zostało spowodowane tym, że Faraday spodziewał się, iż prąd elektryczny w przewodniku mogłoby wyindukować stałe pole magnetyczne³².

Teraz Faraday potrafił także wytłumaczyć zagadkę Arago z dyskiem. Ruch miedzianego przewodnika w obszarze oddziaływania magnesu powodował wyindukowanie prądu elektrycznego wewnątrz dysku, a prąd ten z kolei wywierał magnetyczny wpływ na sam magnes - był to jeden z pierwszych przykładów zjawiska znanego jako sprzężenie zwrotne. Ulepszając nieco ten układ doświadczalny, Faraday zbudował w październiku 1831 roku pierwszy generator elektryczności, w którym miedziany dysk wirował między biegunami dużego magnesu, a dwa druty ślizgały się po powierzchni dysku - jeden w środku, a drugi w pobliżu krawędzi.

Faraday pracował długo i wytrwale nad wyjaśnieniem tych zjawisk. Nadal nie miał przygotowania matematycznego, lecz był obdarzony wyjątkową zdolnością do obrazowego myślenia. W końcu wpadł na rewolucyjny pomysł - zamiast materialnego eteru czy plenum wypełniającego wszechświat i przenoszącego oddziaływanie mechanicznie przez fizycznie stykające się maleńkie elementy - Faraday wprowadził opis sił elektrycznych i magnetycznych (a także grawitacyjnych) w kategoriach „linii sił” przenoszących oddziaływanie przez pustą przestrzeń. Zamiast patrzeć na atomy jak na małe skupiska sztywnej, nieprzenikalnej materii, powinniśmy je uważać za ośrodki oddziaływań - ni mniej, ni więcej, tylko koncentracje sił.

Koncepcja linii sił jest znana każdemu, kto widział proste szkolne doświadczenie z opiłkami żelaza leżącymi na kawałku papieru, pod którym znajduje się magnes. Opiłki rzeczywiście układają się wzdłuż linii biegnących od jednego bieguna magnesu do drugiego. W wiktoriańskiej Anglii była to jednak niezwykle, śmiała koncepcja, szczególnie jeśli chciano zastosować ją do w s z y s t k i c h znanych w przyrodzie sił. Faraday długo się zastanawiał, zanim ogłosił ją publicznie w ramach dwóch wykładów w Royal Institution, w 1844 i 1846 roku. Drugi z tych wykładów został naprędce zaimprovizowany, gdyż w tym dniu zaplanowane było wystąpienie

³² Ten fragment ilustruje, do jakiego stopnia idee Faradaya wrosły w język współczesnej nauki. Prawie nie sposób opisać zwięźle tych odkryć bez użycia słowa „pole”, które jednak weszło do języka nauki znacznie później. Dzisiaj „każdy wie” o istnieniu pól, a linie sił pola są w potocznym użyciu, podobnie jak słowo „eter” w dziewiętnastym stuleciu.

Charlesa Wheatstone'a, którego w ostatniej chwili ogarnęła trema i uciekł ze sceny, zostawiając Faradaya sam na sam z publicznością. Nie mając wyboru, Faraday najpierw streścił niedoszły wykład Wheatstone'a, a następnie improwizował na temat własnych przemyśleń dotyczących linii sił.

W klasycznym przykładzie eksperymentu myślowego Faraday poprosił widzów, aby wyobrazili sobie pozbawione planet Słońce w pustej przestrzeni. Co by się stało, gdyby nagle, w magiczny sposób, w odpowiedniej odległości od Słońca została umieszczona Ziemia? Skąd „wiedziałyby” ona o położeniu Słońca? Faraday argumentował, że jeszcze przed umieszczeniem Ziemi na odpowiedniej orbicie wpływ Słońca rozciągał się w pustej przestrzeni w formie linii sił pola grawitacyjnego. Reakcja Ziemi na pole grawitacyjne Słońca jest reakcją na istnienie linii sił w m i e j s c u p o ł o ż e n i a Z i e m i , a nie na odległą obecność samego Słońca. Z punktu widzenia Ziemi linie sił (pola) są równie realne jak samo Słońce. W taki sam sposób linie sił pola magnetycznego i elektrycznego przenikają wszechświat. Te pola (tak mówimy na nie obecnie) są rzeczywistością fizyczną, a sama materia - atomy - jest jedynie związana z miejscami skupienia pól.

W swoim wykładzie z 1846 roku Faraday posunął się jeszcze dalej i stwierdził, że światło można wytłumaczyć w kategoriach drgań elektrycznych linii sił. W owym czasie powszechnie wiadano, że światło jest falą - czyli pewną formą drgań. Faraday nie miał matematycznego przygotowania, aby rozwinąć swoje idee w pełne wyjaśnienie zjawiska mechanizmu poruszania się światła, lecz stworzył klarowny fizyczny obraz tego zjawiska. Gdy kilka lat później opublikował koncepcje przedstawione w swoim wykładzie z 1846 roku, napisał: „Ośmielam się przedstawić pogląd, zgodnie z którym światło stanowi wysoko rozwiniętą formę drgań linii sił, łączących cząstki i porcje materii. Jest to próba pozbycia się eteru, ale nie samych drgań”³³.

To, jak „wysoka” jest liczba drgań, z którą mamy do czynienia w przypadku światła, zostało w kilka lat później obrazowo zilustrowane w znakomitej książce Johna Tyndalla, innego dziewiętnastowiecznego uczonego. Tyndall zwrócił uwagę, że prędkość światła jest tak duża, iż słup światła o długości 300 000 kilometrów wpada do oka w ciągu jednej sekundy, a długość fali (na przykład - czerwonego) światła jest tak mała, że w tym „słupie” mieści się około 200 000 miliardów grzbietów fali, z których każdy oddziałuje z receptorami na siatkówce oka, tyleż razy w ciągu sekundy angażując zmysł wzroku³⁴.

Poglądy Faradaya na naturę tych fal zostały w ciągu następnych dwóch dziesięcioleci potwierdzone przez prace Maxwella, który opisał drgania pól elektrycznych i magnetycznych za pomocą układu czterech równań opublikowanych w 1864 roku, trzy lata przed śmiercią Faradaya.

³³ M. Faraday, *Experimental Researches in Electricity* [Eksperymentalne badania elektryczności], Taylor & Francis, London 1855, t. 2, s. 451.

³⁴ J. Tyndall, *Sześć wykładów o świetle.*, s. 68; jednostki współczesne.

Magiczne kolory

James Clerk Maxwell był najwybitniejszym fizykiem teoretykiem od czasów Newtona aż do Einsteina. Pochodził z wpływowej osiemnastowiecznej szkockiej rodziny Clerków z Penicuik i wychował się w środowisku całkowicie odmiennym od tego, w którym wzrastał Faraday. W osiemnastym wieku rodzinę Clerków połączyły z równie bogatą szkocką rodziną Maxwellów z Middlebie dwa małżeństwa. Ojciec Jamesa, John Clerk, przyjął nazwisko Maxwell, gdy odziedziczył majątek Middlebie - w pobliżu Dalbeattie w hrabstwie Galloway w południowo-zachodniej Szkocji - który rozciągał się na obszarze około 1500 akrów³⁵. John Clerk Maxwell był prawnikiem, lecz miał także zainteresowania naukowe i należał do Royal Society w Edynburgu. Tak więc James miał ułatwiony start nie tylko ze względu na majątną rodzinę, ale także dzięki temu, że bardzo wcześnie został wprowadzony w świat nauki.

Urodził się w 1831 roku w Edynburgu, gdzie jego rodzice przebywali w czasie ciąży matki, aby zapewnić jej najlepszą możliwą opiekę lekarską. Jednak pierwsze dziesięć lat życia James spędził w posiadłości Glenlair House w hrabstwie Galloway. Był jedynym dzieckiem swoich rodziców. Matka nauczyła go czytać i nadzorowała jego wczesną edukację, lecz zmarła na raka w wieku 48 lat, gdy James miał osiem lat. W tych czasach Dalbeattie było jeszcze zapadłą prowincją, odległą o cały dzień drogi od Glasgow i dwa dni od Edynburga. W 1837 roku zbudowano linię kolejową między Glasgow a Edynburgiem, a połączenie z Dalbeattie powstało w roku 1846. Maxwell nie miał żadnych rówieśników; śmierć matki była dla niego wielkim ciosem, a na dodatek przez następne dwa lata miał nauczyciela o zdecydowanie staroświeckich poglądach na edukację i uczył się głównie łaciny na pamięć. W wieku dziesięciu lat został wysłany do ciotki do Edynburga, gdzie pobierał nauki w Edinburgh Academy, a do Glenlair wracał na wakacje.

Jego szkolni koledzy nawet nie przypuszczali, że to dojrzewający geniusz. Miał wiejski akcent, ubranie całkiem odmienne od tego, w czym chodzili miejscy chłopcy, a jego buty zaprojektował i własnoręcznie wykonał ojciec, wykazując więcej praktycznych umiejętności niż zdrowego rozsądku. Po pierwszym dniu szkoły Maxwell wrócił do domu ciotki zmaltretowany i posiniaczony, w potarganym ubraniu i z nowym przydomkiem Dafty³⁶. To imię przylgnęło do niego na cały okres pobytu w szkole, aczkolwiek stanowiło oznakę raczej odmienności od reszty rówieśników niż jakichkolwiek niedostatków intelektualnych.

Mimo nie najlepszego startu, Maxwell całkiem dobrze dawał sobie radę w szkole. Kilka lat później zademonstrował swoje matematyczne uzdolnienia, gdy wymyślił sposób narysowania owalu (a nie elipsy, jak podają niektóre biografie) za pomocą pętli zrobionej z kawałka sznurka. Dzięki kontaktom ojca w naukowym środowisku Edynburga odkrycie to ukazało się drukiem jako pierwsza naukowa publikacja Jamesa, gdy miał on zaledwie 14 lat. Mimo że publikacja bynajmniej nie wstrząsnęła światem nauki, dała Maxwellowi w bardzo młodym wieku możliwość poznania naukowych kręgów Edynburga.

³⁵ 1 akr to około 0,4 hektara (przyp. tłum.).

³⁶ Ang.: głupek (przyp. tłum.).

W 1847 roku, w wieku 16 lat (w owym czasie był to typowy wiek, w którym rozpoczynano studia) Maxwell zapisał się na uniwersytet w Edynburgu. Po zaliczeniu trzeciego, przedostatniego roku przeniósł się do Cambridge, gdzie w 1854 roku ukończył studia z matematyki. Dwa lata później został profesorem filozofii naturalnej w Marischal College w Aberdeen. W 1860 roku powstał uniwersytet w Aberdeen - w wyniku połączenia Marischal College z Kings College - i jeden z dwóch profesorów filozofii naturalnej musiał ustąpić ze stanowiska. Maxwell, jako młodszy, stracił pracę, mimo że w owym czasie był już zięciem dyrektora Marischal College. Kolejne pięć lat przepracował w Kings College w Londynie, ale wrócił do rodzinnego domu w Szkocji, gdy w 1865 roku zmarł jego ojciec. Następne sześć lat spędził jako ziemianin i naukowiec amator, dzięki czemu miał czas na spisanie swojej wiekopomnej pracy o elektryczności i magnetyzmie w formie książkowej. W 1874 roku dał się przekonać do powrotu do Cambridge, gdzie został pierwszym profesorem fizyki doświadczalnej i pierwszym kierownikiem Cavendish Laboratory, które między innymi dzięki niemu stało się jednym z czołowych ośrodków naukowych na świecie. James Clerk Maxwell zmarł w 1879 roku, w tym samym wieku, co jego matka, i również na raka.

Naukowe zainteresowania Maxwella obejmowały szeroki zakres dziewiętnastowiecznej fizyki, łącznie z kinetyczną teorią gazów, ciepłem i termodynamiką, naturą i przyczyną stabilności pierścieni Saturna, dokładnym oszacowaniem rozmiarów cząsteczek chemicznych i wieloma innymi dziedzinami. Ale jego najważniejsze odkrycia wiązały się z naturą światła i koloru. Pierwsze z jego poważnych odkryć z pozoru miało w sobie więcej magii niż nauki - Maxwell pokazał, w jaki sposób za pomocą trzech czarno-białych obrazów można wykonać kolorową fotografię. Tę samą technikę stosuje się do dzisiaj w kolorowej fotografii, między innymi przy transmisji kolorowych fotografii Saturna i innych odległych obiektów Układu Słonecznego. Gdy sonda kosmiczna bada pierścienie Saturna, których dynamikę wyjaśnił Maxwell, a następnie wysyła na Ziemię ich fotografie, transmisja kolorowego obrazu opiera się na technice wynalezionej przez Maxwella - za pomocą fal radiowych będących częścią widma elektromagnetycznego, którego właściwości również wyjaśnił (w przypadku fal radiowych - raczej przewidział) Maxwell. Trudno o lepszą ilustrację jego wszechstronnych uzdolnień.

Odkrycie Maxwella opierało się na spostrzeżeniu Younga, że wrażenie koloru wiąże się z działaniem trzech rodzajów receptorów w oku, z których każdy reaguje na jeden z trzech podstawowych kolorów - czerwony, zielony i niebieski (teoria Younga wyjaśnia również daltonizm, czyli ślepotę na barwy spowodowaną przez uszkodzenie jednego lub większej liczby receptorów). Maxwell zaczął badania kolorów w czasie studiów na uniwersytecie w Edynburgu, gdy pracował w laboratorium, którego szefem był James Forbes, profesor filozofii naturalnej. To właśnie Forbes był tą osobą, której ojciec Maxwella pokazał odkrycie związane z rysowaniem owalu, co doprowadziło do publikacji w „Proceedings of the Royal Society of Edinburgh”. Forbes i Maxwell konstruowali wirujące krążki, podzielone na różnokolorowe sektory, i badali efekt wywierany na oko przez różne kombinacje kolorów.

Forbes musiał po pewnym czasie przerwać eksperymenty ze względu na poważną chorobę, a wkrótce potem Maxwell wyjechał z Edynburga. Gdy w 1854 roku ukończył studia w Cambridge, wrócił do badania kolorów i pokazał, w jaki sposób można uzyskać różne kolory, mieszając trzy barwy podstawowe, a także skonstruował urządzenie, nazwane przez siebie „pułdem kolorów”, w którym trzy podstawowe kolory były najpierw wydzielane ze światła słonecznego, a następnie łączone ponownie w różnych proporcjach, dzięki czemu można było uzyskać każdy żądany kolor.

Ukoronowaniem tego kierunku prac Maxwella była przedstawiona w 1861 roku w Royal Institution projekcja pierwszej kolorowej fotografii. Pokaz zrobił ogromne wrażenie na widowni, wśród której obecny był sam Faraday. Był to pierwowzór techniki kolorowej fotografii, a także kolorowej telewizji. Maxwell wykonał najpierw trzy oddzielne czarno-białe fotografie wstążki w szkocką kratę, przez trzy różne filtry - czerwony, niebieski i zielony. Każdy filtr przepuścił światło tylko jednego (tego samego co filtr) koloru, więc każda z trzech płyt zawierała informację - w postaci zaczerpnienia emulsji fotograficznej - odpowiadającą tylko jednemu z trzech kolorów. Każda płyta z osobna była jedynie czarno-białą fotografią tej samej wstążki, z nieco różnym układem zaczerpnienia, lecz żadna z nich nie zawierała ani śladu jakiegokolwiek koloru.

Płyty były następnie rzutowane na ekran w taki sposób, aby trzy obrazy pokryły się dokładnie, a światło z każdego projektora przechodziło przez filtr takiego samego koloru, jak ten, którego użyto przy naświetlaniu odpowiedniej płyty fotograficznej. Trzy fotografie zostały najpierw pokazane na ekranie pojedynczo, jako czerwony, niebieski i zielony obraz tej samej wstążki, dzięki czemu widownia przekonała się, że połączony obraz składa się z mieszaniny czerwonego, niebieskiego i zielonego światła, dokładnie takiej samej mieszaniny, jakiej użyto do naświetlenia płyt. Gdy wszystkie trzy projektory zostały uruchomione równocześnie, obraz na ekranie zawierał wszystkie kolory szkockiej wstążki. W ten sposób Maxwell zademonstrował, że ludzka percepcja koloru wykorzystuje jedynie trzy podstawowe kolory.

Sonda kosmiczna stosuje w gruncie rzeczy taką samą sztuczkę, wykonując trzy fotografie przez trzy różne filtry, a następnie transmitując dane (czyli informację o zaczerpnieniu tych trzech fotografii) oddzielnie dla każdego obrazu na Ziemię, gdzie komputer dokonuje rekonstrukcji kolorowej fotografii. Na podobnej zasadzie działa ekran telewizora. Pokrywa go układ małych plamek, z których każda składa się z trzech elementów, a każdy element może świecić w jednym z trzech podstawowych kolorów. Pobudzając do świecenia odpowiednią kombinacją trzech kolorów w każdej plamce, można uzyskać dowolny kolor w dowolnym punkcie ekranu, czyli obraz dowolnego kolorowego przedmiotu na ekranie telewizora.

Pokaz w Royal Institution był bez wątpienia sukcesem - zachowały się wspomnienia uczestników, które świadczą jednoznacznie o tym, że trójkolorowy obraz był dobrze widoczny na ekranie - lecz Maxwell w stopniu większym, niż zdawał sobie w owym czasie sprawę, zawdzięczał go magii. Wiele lat później okazało się, że zastosowane przez niego odczynniki fotograficzne nie są w ogóle czułe na czerwone światło. Zagadkę rozwiązano w latach sześćdziesiątych w laboratorium Kodaka w Stanach Zjednoczonych. Okazało się, że czerwone elementy wstążki, którą

fotografował Maxwell, odbijały także światło ultrafioletowe (niewidoczne dla ludzkiego oka), a także - przez czysty przypadek - że zastosowany przez niego czerwony filtr przepuszczał również ultrafiolet. Obraz na czerwonej płycie w czasie pokazu Maxwella był w rzeczywistości utworzony przez światło ultrafioletowe, lecz dzięki temu przypadkowemu zbiegowi okoliczności był on dokładnie taki, jaki powstałby, gdyby płyta była czuła na światło czerwone.

Oryginalne płyty fotograficzne, zastosowane przez Maxwella, zachowały się w Cambridge i w 1961 roku, w setną rocznicę tego wydarzenia, zostały wykorzystane do odtworzenia pokazu w Royal Institution. Uzyskany obraz nadal zawierał wszystkie kolory wstążki, aczkolwiek tym razem widzowie zdawali sobie sprawę, że czerwona składowa zawdzięcza swe istnienie szczęśliwemu zbiegowi okoliczności. Tak więc magia Maxwella polegała, przynajmniej w tym wypadku, nie tylko na otrzymaniu kolorowego obrazu z trzech czarno-białych fotografii i trzech (czerwonej, niebieskiej i zielonej) wiązek światła, lecz także na uzyskaniu właściwego wyniku z (częściowo) błędnego założenia. Jednak w swoim największym osiągnięciu naukowym James Clerk Maxwell uzyskał właściwy wynik na podstawie właściwych założeń - a wynik ten dostarczył następnym pokoleniom fizyków wiele zagadek i wiele tematów do rozmyślań.

Zdumiewające równania Maxwella

Maxwell zaczął poważne badania nad elektrycznością i magnetyzmem w 1854 roku, tuż po ukończeniu studiów w Cambridge. W poprzedniej dekadzie William Thomson (1824-1907), późniejszy Lord Kelvin (1892), odkrył matematyczną analogię między przepływem ciepła w ciele stałym a układem sił elektrycznych. Zaintrygowany tą korelacją Maxwell próbował znaleźć podobne analogie, wymieniając korespondencyjnie wiele idei z Thomsonem. Jego pierwsza praca z elektromagnetyzmu, która ukazała się w połowie lat pięćdziesiątych dziewiętnastego wieku, dotyczyła analogii między liniami sił Faradaya a „strugami” nieściśliwej cieczy.

Podobieństwo między równaniami opisującymi tak różne rzeczy jak elektryczność i przepływ ciepła lub cieczy nie oznacza, zdaniem Maxwella, że elektryczność jest rzeczywiście podobna do ciepła lub cieczy - analogie mają charakter czysto matematyczny. Jest to „podobieństwo między relacjami, a nie między obiektami”. Ten sam rodzaj równań opisuje przepływ ciepła lub cieczy i elektryczność, lecz nie oznacza to, że elektryczność jest wodą, podobnie jak nie oznacza to, że woda jest ciepłem.

W ciągu następnych dziesięciu lat Maxwell rozszerzył analogię między elektrycznością i przepływem cieczy i stworzył fizyczny obraz - obecnie robi on dość dziwaczne wrażenie - w którym siły elektryczne i magnetyczne są przenoszone dzięki oddziaływaniu swego rodzaju wirów w cieczy wypełniającej przestrzeń między obiektami materialnymi, czyli wirów eteru. W pewnym sensie był to krok wstecz od idei Faradaya, zgodnie z którą nie ma potrzeby istnienia eteru i tylko siły - czyli pola sił - są istotne. Fizyczny obraz, z którego korzystał Maxwell przy wyprowadzaniu swoich równań okazał się jednak mniej istotny niż same równania. Te same zależności matematyczne mogą opisywać różne fizyczne układy, jak pokazała analogia między przepływem ciepła i cieczy, a równania Maxwella, niezależnie od fizycznego obrazu, dokładnie opisują

działanie sił między elektrycznie naładowanymi lub namagnesowanymi obiektami - p o d w a r u n k i e m że właściwości ośrodka (eteru) są odpowiednio dobrane.

Następny przebieg intuicji Maxwella polegał na rozważeniu, co się stanie, jeżeli ten ośrodek będzie ściskany lub rozciągany - inaczej mówiąc, gdy będzie on elastyczny. Jest oczywiste, że fale mogą się poruszać w elastycznym ośrodku. Ich prędkość zależy od właściwości ośrodka. W 1862 roku Maxwell odkrył, że jeżeli ośrodek ma takie właściwości, jakie są konieczne, aby wytłumaczyć siły elektryczne i magnetyczne, to fale będą się poruszać z prędkością światła. W publikacji, która ukazała się w tym samym roku, Maxwell nie ukrywa swego podniecenia, związanego z tym odkryciem: „Nie możemy uniknąć konkluzji, że światło polega na poprzecznych drganiach tego samego ośrodka, który stanowi przyczynę zjawisk elektrycznych i magnetycznych”³⁷.

Ostateczna postać matematycznego opisu zjawisk elektromagnetycznych i światła wymagała jeszcze sporo pracy. Maxwell odkrył, że może całkowicie zrezygnować z koncepcji wirów. Wszystkie znane zjawiska elektryczne i magnetyczne można opisać w kategoriach *Dynamicznej teorii pola elektromagnetycznego* - pod takim tytułem ukazała się w 1864 praca, zawierająca cztery równania, znane obecnie jako równania Maxwella. Aby znaleźć siłę, z jaką przyciągają się dwa określone ładunki elektryczne oddalone od siebie na określoną odległość, wystarczy rozwiązać odpowiednie równanie Maxwella. Aby znaleźć natężenie prądu, wywołanego przez ruch określonego magnesu, wystarczy rozwiązać odpowiednie równanie Maxwella. K a ż d y problem związany z elektrycznością i magnetyzmem (z wyjątkiem pewnych efektów kwantowych, do których wrócimy w następnym rozdziale) może być rozwiązany z użyciem równań Maxwella. Ten układ równań stanowi największe osiągnięcie naukowe od czasów Newtona. Równania zawierają pewną stałą (oznaczaną zwykle literą c), która odpowiada prędkości, z jaką poruszają się fale elektromagnetyczne.

Wartość stałej c można wyznaczyć za pomocą eksperymentów, w których mierzy się elektryczne i magnetyczne właściwości ładunków elektrycznych - zarówno nieruchomych, jak i poruszających się w postaci prądu elektrycznego. Inaczej mówiąc, jest to liczba, którą można wyznaczyć wyłącznie na podstawie badań elektryczności i magnetyzmu. Jak powiedział sam Maxwell, „światła użyto w eksperymencie tylko do patrzenia na przyrządy”. Liczba, którą otrzymuje się w wyniku przeprowadzenia tych eksperymentów, jest jednak dokładnie równa prędkości światła:

Ta prędkość jest tak bliska prędkości światła, że mamy chyba poważne powody wnioskować, iż samo światło (łącznie z promieniowaniem cieplnym oraz innymi formami

³⁷ *On the Physical Lines of Force* [O fizycznych liniach sił], cytowane za: C.W.F. Everitt, *James Clerk Maxwell*, s. 99; podkreślenie Maxwella.

promieniowania, jeśli takowe istnieją) jest zaburzeniem elektromagnetycznym w formie fal poruszających się w polu elektromagnetycznym zgodnie z prawami elektromagnetyzmu³⁸.

Maxwell zdał sobie sprawę, że mogą istnieć inne rodzaje fal elektromagnetycznych oprócz tych, które widzimy jako światło - ciepło, znane obecnie jako promieniowanie podczerwone, oraz „inne formy promieniowania”, łącznie z tymi, które obecnie znamy jako fale radiowe. To przewidywanie potwierdził doświadczalnie Heinrich Hertz w latach osiemdziesiątych dziewiętnastego wieku, gdy wygenerował długofalowe promieniowanie elektromagnetyczne za pomocą pionowych drutów, w których wytworzył oscylujący prąd elektryczny. Zmierzywszy prędkość rozchodzenia się tego promieniowania, Hertz przekonał się, że fale radiowe rzeczywiście poruszają się z prędkością światła, zgodnie z przewidywaniami Maxwella, a także, podobnie jak światło, w odpowiednio skonstruowanych układach doświadczalnych ulegają ugięciu, odbiciu i rozpraszaniu.

We współczesnej interpretacji równań Maxwella eter i wiry zniknęły i zostały zastąpione przez linie sił Faradaya, czyli przez pole elektromagnetyczne. Jest to oczywiście tylko najnowsza inscenizacja teorii elektromagnetyzmu - nasze wyobrażenia o tym, czym w „rzeczywistości” jest elektron, nie są lepsze od wyobrażeń Faradaya, Maxwella czy kogokolwiek innego³⁹. Zaletą teorii pola jest jej prostota oraz łatwość, z jaką opisuje funkcjonowanie matematycznego formalizmu, lecz modele nigdy nie powinny być uważane za coś więcej niż wspomaganie wyobraźni, za sposób na przedstawienie sobie (lub obliczenie), co się dzieje. Rzeczywistość tkwi w samych równaniach niezależnie od tego, czy opisują one fale elektromagnetyczne, przepływ ciepła czy cieczy. Dopóki równania poprawnie opisują zmiany, jakim ulega układ pod wpływem określonego zaburzenia, nie ma znaczenia, w jaki sposób wyobrażamy sobie działanie sił.

Mimo to większość ludzi potrzebuje analogii lub modeli, aby wyobrazić sobie, co się dzieje. Najprostszy obraz światła polega na wyobrażeniu sobie fali przemieszczającej się wzdłuż napiętego sznura. Pamiętając, że zmieniające się pole magnetyczne wytwarza pole elektryczne, a zmieniające się pole elektryczne wytwarza pole magnetyczne, możemy wyobrazić sobie dwie fale poruszające się w zsynchronizowany sposób, podobnie jak fale, które powstają, gdy potrząsamy jednym końcem sznura. Przypuśćmy, że zaburzenia elektryczne odbywają się w płaszczyźnie pionowej, magnetyczne w płaszczyźnie poziomej, a jedno i drugie są prostopadłe do kierunku sznura i do siebie nawzajem. W każdym miejscu sznura natężenie pola elektrycznego cały czas się zmienia - w miarę przemieszczania się fal. Zmieniające się pole elektryczne wytwarza zmieniające się pole magnetyczne, więc w każdym miejscu sznura zmianie ulega natężenie pola magnetycznego - w miarę wędrówki fal wzdłuż sznura. Zmieniające się pole magnetyczne wytwarza zmieniające się pole elektryczne. Oba pola maszerują tym samym rytmem, nawzajem się generując, jako promień światła napędzany energią wyzwoloną przez źródło tegoż światła.

³⁸ Oba cytaty z pracy Maxwella z 1864 roku podano za: R. Baierlein, *Newton to Einstein*, s. 122.

³⁹ Autor nieco się zapędził i popełnił mały błąd - elektron został odkryty dopiero w 1897 roku (przyp. tłum.).

Ten zgrabny obrazek nie powstał równocześnie z pracą Maxwella z 1864 roku. Jeszcze w 1878 roku w artykule dla *Encyclopaedia Britannica* Maxwell zdecydowanie opowiedział się za istnieniem eteru: „Niezależnie od trudności związanych ze stworzeniem spójnej koncepcji struktury eteru nie ma wątpliwości, że międzyplanetarne i międzygwiazdowe przestrzenie są wypełnione materialną substancją lub materialnym ciałem”⁴⁰.

Teoria Maxwella zdobyła szerokie uznanie pod koniec jego życia, lecz ostateczny status jedynej teorii światła uzyskała dekadę później, w okresie badań fal radiowych. Doświadczenie, które stało się gwoździem do trumny koncepcji eteru (i które zresztą było częściowo inspirowane artykułem w *Encyclopaedia Britannica* z 1878 roku), również zostało wykonane w latach osiemdziesiątych dziewiętnastego wieku, lecz jego znaczenie w pełni zrozumiano dopiero na początku dwudziestego wieku. Osoba, która wyjaśniła światu prawdziwe znaczenie stałej c w równaniach Maxwella, a także ustawiła w odpowiedniej perspektywie znaczenie tego kluczowego doświadczenia, nie miała jeszcze ośmiu miesięcy, gdy Maxwell zmarł w listopadzie 1879 roku. Osobą tą był Albert Einstein, a jego pojawienie się oznaczało początek współczesnej fizyki.

⁴⁰ Por. np. A. Zajonc, *Catching the Light*, s. 146.

Rozdział drugi

Czasy współczesne

Isaac Newton, a w ślad za nim dziewiętnastowieczni fizycy zdawali sobie sprawę ze względności ruchu. Księżyc na swojej orbicie porusza się względem Ziemi, a Ziemia względem Słońca. Jeżeli auto jadące po prostej drodze z prędkością 50 km/h wyprzedza mnie, gdy jadę na rowerze z prędkością 15 km/h, to względem mnie porusza się ono z prędkością 35 km/h. Gdy równania Maxwella dały dokładną wartość prędkości światła, fizycy uznali, że jest to prędkość względem eteru - substancji, którą uważano za ośrodek przenoszący fale elektromagnetyczne. Ziemia porusza się po niemal kołowej orbicie wokół Słońca, a więc kierunek jej prędkości względem eteru cały czas się zmienia; w pewnej chwili porusza się ona w jedną stronę, a sześć miesięcy później - na drugim końcu orbity - w przeciwną. Połączenie newtonowskiej koncepcji względności ruchu⁴¹ oraz idei, zgodnie z którą światło jest falą elektromagnetyczną przemieszczającą się przez eter, w naturalny sposób prowadziło do konkluzji, że prędkość światła w z g l ę d e m Z i e m i musi być różna w różnych porach roku.

Niektórzy astronomowie próbowali - bezskutecznie - wykryć tę różnicę, badając światło planet i gwiazd w różnych porach roku. Istnieje jednak sposób na zmierzenie tego efektu za pomocą doświadczeń możliwych do wykonania całkowicie na Ziemi, bez konieczności obserwowania pozaziemskiego światła. Jeżeli promień światła biegnie w tym samym kierunku co Ziemia, to powinien on poruszać się nieco wolniej względem naszych przyrządów pomiarowych. Gdy natomiast wiązka światła biegnie prostopadle do orbitalnego kierunku ruchu Ziemi, to pomiar jej prędkości powinien dać pełną wartość c , zgodnie z równaniami Maxwella.

Efekt związany z ruchem Ziemi po orbicie jest oczywiście bardzo mały w porównaniu z prędkością światła, która wynosi (około) 300 000 km/s, podczas gdy orbitalna prędkość Ziemi wynosi nieco mniej niż 30 km/s, czyli około 0,01% prędkości światła. W swoim artykule do *Encyclopaedia Britannica* Maxwell zwrócił uwagę, w jaki sposób można zmierzyć prędkość Ziemi względem eteru, wykorzystując do pomiaru właśnie światło. W zasadzie powinno być możliwe rozszczepienie wiązki światła na dwie i wysłanie każdej z nich w „podróż” między parą luster. Jedna wiązka miałaby się poruszać - odbijając się od swoich luster - wzdłuż tego samego kierunku co Ziemia, a druga wiązka prostopadle do tego kierunku. Następnie obie wiązki zostałyby ponownie połączone, w wyniku czego doszłoby do ich interferencji, podobnie jak w doświadczeniu Younga z dwiema szczelinami. W tak zaprojektowanym układzie dwie wiązki światła poruszałaby się z nieco różnymi prędkościami względem Ziemi. W wyniku ich powtórnego spotkania powinny powstać prążki interferencyjne, pod warunkiem że odległości przebyte przez obie wiązki byłyby dokładnie takie same. Odległość między prążkami powinna być proporcjonalna do prędkości Ziemi

⁴¹ To jest właściwie treść tak zwanej zasady Galileusza, a nie Newtona (przyp. tłum.).

względem eteru, lecz efekt ten byłby tak mały, że jego zmierzenie, zdaniem Maxwella, nie byłoby możliwe. Jednak niemal natychmiast wyzwanie to podjął pewien młody amerykański naukowiec.

Śmierć eteru

Albert Michelson urodził się w 1852 roku w Niemczech⁴², ale jego rodzina wyemigrowała do Stanów Zjednoczonych, gdy był jeszcze dzieckiem. Ukończył Akademię Marynarki Wojennej w Annapolis w 1873 roku i po spędzeniu dwóch lat na morzu został instruktorem w swojej macierzystej uczelni. Do jego obowiązków, jako wykładowcy fizyki i chemii, należało między innymi pokazywanie kadetom, w jaki sposób można zmierzyć prędkość światła. Niezadowolony z ówczesnej techniki pomiarowej, Michelson opracował dokładniejszą metodę. Nabyte wówczas doświadczenie umożliwiło mu podjęcie wyzwania zawartego w artykule Maxwella w *Encyclopaedia Britannica*. Do wykonania pomiaru ruchu Ziemi względem eteru Michelson wykorzystał skonstruowany przez siebie interferometr. Przez całą dalszą karierę Michelson konstruował coraz lepsze interferometry i wykonywał coraz dokładniejsze pomiary za pomocą wiązek światła.

Zastosowana przez Michelsona metoda pomiarowa opierała się na odbijaniu wiązek światła od obracających się luster. Autorem tego pomysłu był Francuz, Jean Foucault (1819-1868), znany bardziej dzięki wynalazkowi żyroskopu i demonstracji orbitalnego ruchu Ziemi za pomocą innego słynnego doświadczenia (z wahadłem). Foucault mierzył prędkość światła za pomocą wiązek światła odbijających się od szybko wirującego płaskiego lustra. Odbity promień podążał następnie w kierunku innego lustra, odbijał się od niego i wracał w kierunku pierwszego, które tymczasem zdążyło się nieco przemieścić na skutek swojego ruchu wirowego. Kąt, pod jakim odbijał się promień od ruchomego lustra, był zależny od czasu, jaki zabrała mu podróż od jednego lustra do drugiego i z powrotem, co umożliwiało bezpośredni pomiar prędkości światła.

Foucault zastosował tę technikę po raz pierwszy w 1850 roku, gdy zademonstrował, że światło porusza się wolniej w wodzie niż w powietrzu, potwierdzając tym samym falową naturę światła. Następnie udoskonalił ją na tyle, że w 1862 roku udało mu się zmierzyć prędkość światła, a uzyskany wynik, 298 000 km/s, różni się o mniej niż o 1 % od obecnie przyjętej wartości.

Michelson udoskonalił tę technikę jeszcze bardziej, dodając kolejne lustra i zwiększając odległość pokonywaną przez wiązkę światła. W tym celu zastosował obracający się ośmiokątny bęben z lustrami (w późniejszych eksperymentach liczba luster była jeszcze większa). Znając prędkość obrotu bębna, można obliczyć czas obrotu bębna o jedną ósmą pełnego kąta - tyle czasu potrzeba, aby kolejne lustro ustawiło się w pewnym określonym położeniu i odbiło promień światła. Zmieniając prędkość wirowania bębna, można doprowadzić do sytuacji, w której jedno lustro odbija promień światła w jego podróży na zewnątrz, a powracający promień trafia na następne lustro. Tym sposobem Michelson potrafił wyznaczyć czas potrzebny światłu na pokonanie określonej odległości między bębniem a zewnętrznym lustrem.

⁴² W miejscowości Strzelno na Pomorzu (przyp. tłum.).

W ostatecznej wersji tego doświadczenia, które przeprowadził w 1926 roku w wieku 73 lat, Michelson posłał wiązkę światła w podróż między dwoma górskimi szczytami w Kalifornii. Otrzymana wartość prędkości światła wyniosła $299\,796 \pm 4 \text{ km/s}$. W granicach błędu doświadczalnego wynik Michelsona zgadza się z obecnie przyjętą wartością, która wynosi $299\,792,5 \text{ km/s}$. Zapytany, dlaczego w tym wieku zajmował się tak trudnymi pomiarami, Michelson odpowiedział: „To świetna zabawa”⁴³.

Zmarł w 1931 roku w wieku 79 lat, bawiąc się przygotowaniem do kolejnego, jeszcze bardziej dokładnego pomiaru prędkości światła.

Na początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku Michelson, wraz ze swoim współpracownikiem, Edwardem Morleyem, zmierzył długość wzorca metra przechowywanego w Paryżu w jednostkach długości fali światła z czerwonej części widma. Dopiero w latach sześćdziesiątych zasadniczo identyczna technika, oparta na pomiarach właściwości światła, została uznana za oficjalną metodę wyznaczania jednostki długości - metra. Michelson, jako pierwszy Amerykanin, otrzymał Nagrodę Nobla w 1907 roku w dziedzinie fizyki, za swoje pionierskie prace związane z pomiarami prędkości światła i z konstruowaniem precyzyjnych przyrządów optycznych. Jego nazwisko jest dziś jednak pamiętane w związku z eksperymentem, który przeprowadził wspólnie z Morleyem w drugiej połowie lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku.

W 1880 roku Michelson opuścił Annapolis i udał się, w ramach urlopu naukowego, do Berlina, Heidelbergu i Paryża. Znał on oczywiście artykuł Maxwella o eterze w *Encyclopaedia Britannica*. Pracując w laboratorium Hermanna Helmholtza w Berlinie w 1881 roku, próbował zmierzyć prędkość ruchu Ziemi względem eteru z użyciem tej samej techniki, którą zaproponował Maxwell. W tym celu opracował własną konstrukcję interferometru i zbudował go dzięki finansowemu wsparciu Alexandra Grahama Bella, ale doświadczenie dało negatywny wynik - przewidywany przez Maxwella efekt się nie pojawił. Nikt się tym specjalnie w owym czasie nie przejął, po pierwsze dlatego, że eksperyment był trudny do przeprowadzenia (a zatem mógł dać zły wynik), a po drugie dlatego, że pojawiła się sugestia, zgodnie z którą eter miał być „ciągnięty” (unoszony) przez Ziemię, co oznaczałoby, że pomiary wykonywane na powierzchni Ziemi nie mogłyby wykryć żadnego „dryfu” - ruchu Ziemi względem eteru.

Michelson nigdy nie wrócił do pracy w Annapolis. Wystąpił z Marynarki Wojennej i podjął pracę jako profesor fizyki w Case School of Applied Science⁴⁴ w Clevelandzie w stanie Ohio. Jednym z jego pierwszych przedsięwzięć w nowym miejscu pracy był pomiar prędkości światła, który dał wynik $186\,320 \text{ mil na sekundę}$ ($299\,845 \text{ km/s}$). Przez następne dziesięć lat była to najdokładniejsza wartość stałej c , poprawiona w 1892 roku przez samego Michelsona.

W 1885 roku duński fizyk, Hendrik Lorentz (1853-1928), wykazał, że hipoteza unoszenia eteru przez Ziemię nie może być słuszna oraz że pewne pomiary astronomiczne są sprzeczne z założeniem o stałej prędkości światła względem eteru i o ruchu Ziemi względem eteru. Odkrycia

⁴³ Cytowane za: R. Weber, *Pioneers in Science*, s. 33.

⁴⁴ Odpowiednik politechniki (przyp. tłum.).

Lorentza zachęciły Michelsona do ponownego wykonania eksperymentów, wspólnie z Edwardem Morleyem, profesorem chemii Western Reserve University w Clevelandzie (w wyniku połączenia Western Reserve University z Case School powstał później Case Western Reserve University). Morley (1838-1923), podobnie jak Michelson, całą karierę zawodową poświęcił precyzyjnym pomiarom - między innymi masy atomowej tlenu i jego zawartości w powietrzu. W 1887 roku za pomocą ulepszonej wersji interferometru przeprowadzili oni ponownie interferencyjny eksperyment Michelsona, próbując wykryć skutki względnego ruchu Ziemi i eteru. Uzyskane wyniki były tym razem tak dokładne, że rozwiały wszelkie wątpliwości - nie ma żadnych śladów ruchu Ziemi względem eteru. Inaczej mówiąc, prędkość światła względem Ziemi jest zawsze dokładnie taka sama.

Jak to jest możliwe?

W stronę szczególnej teorii względności

Może to oznaczać, że nie ma dowodów istnienia eteru. Wystarczy chwila zastanowienia, żeby dojść do wniosku, że eter, w którego istnienie wierzyli wiktoriańscy fizycy, musiałby mieć bardzo szczególne własności. Po pierwsze, światło porusza się z tak dużą prędkością, że eter musiałby być wyjątkowo sztywny, aby to umożliwić. Drgania przemieszczają się w ośrodku tym szybciej, im większa jest sztywność ośrodka - prędkość dźwięku w stalowym pręcie jest większa niż w powietrzu. Jednak prędkość dźwięku w powietrzu wynosi zaledwie 344 m/s. Spróbujmy sobie wyobrazić substancję tak sztywną, że drgania przemieszczałyby się w niej z prędkością 300 000 km/s, a będziemy mieć jakieś wyobrażenie o jednej z kluczowych właściwości eteru.

Po drugie, eter musi być bardzo rzadki. Opór eteru w żaden widoczny sposób nie spowalnia Ziemi w jej ruchu wokół Słońca, a przecież porusza się ona w eterze, gdyż eter - aby przenosić światło - musi być wszędzie, nawet wewnątrz atomu czy molekuly powietrza. Gdziekolwiek postawimy stopę, przemieszczamy się przez eter. Wdychając powietrze, wdychamy eter. Mimo to nie wywiera on na nas żadnego wpływu, z jednym wyjątkiem - transmituje światło.

Jest dosyć prawdopodobne, że nawet gdyby Michelson i Morley nie wykonali swojego doświadczenia, to dziewiętnastowieczni fizycy prędzej czy później odrzuciliby koncepcję eteru. Konkurencyjna propozycja Faradaya, zgodnie z którą elektryczne i magnetyczne pole rozciąga się w pustej przestrzeni, nie była w pełni zaakceptowana jeszcze przez następne pokolenie, nawet po tym, jak równania Maxwella pokazały, w jaki sposób zmienne pola magnetyczne i elektryczne mogą przemieszczać się razem jako fale elektromagnetyczne. Moment zmian był już jednak blisko.

Wkrótce po tym, jak w 1887 roku Michelson i Morley opublikowali definitywne wyniki swoich eksperymentów, pojawiły się pierwsze oznaki nadchodzącej rewolucji, która - aby wytłumaczyć właściwości światła - musiała diametralnie zmienić spojrzenie fizyków na świat. Urodzony w 1851 roku w Dublinie irlandzki fizyk, George Fitzgerald, dał się po raz pierwszy poznać środowisku fizyków dzięki temu, że prawidłowo przewidział, w jaki sposób oscylujący prąd elektryczny powinien wytwarzać coś, co obecnie nazywamy falami radiowymi. Przyczyniło się to do ich eksperymentalnego odkrycia przez Heinricha Hertza. W 1889 roku Fitzgerald zaproponował

wyjaśnienie wyników doświadczenia Michelsona-Morleya. Brak wykrywalnych zmian w prędkości światła niezależnie od tego, w jaki sposób porusza się ono względem Ziemi, może być spowodowany tym, że układ doświadczalny (co więcej - sama Ziemia) kurczy się wzdłuż kierunku ruchu. To rozwiązałoby cały problem - prędkość światła względem Ziemi byłaby „rzeczywiście” zależna od ruchu Ziemi względem eteru, lecz aparatura doświadczalna ulegałaby skróceniu dokładnie o tyle, ile potrzeba, aby w wyniku eksperymentu uzyskać iluzję, że prędkość światła nadal wynosi c .

Wbrew pozorom nie był to taki zupełnie zwariowany pomysł. Fizycy wiedzieli już - w gruncie rzeczy pokazał to Maxwell - że siła, z jaką oddziałują dwa ładunki elektryczne, zależy od tego, w jaki sposób się poruszają. W wyniku działania większej siły ładunki przyciągałyby się (lub odpychały) mocniej, więc Fitzgerald sugerował, że siły wiążące atomy i cząsteczki byłyby większe, jeżeli atomy te znajdowałyby się w ruchu (nadal mamy tu na myśli ruch w z g l ę d e m e t e r u), co powodowałoby ich wzajemne zbliżenie i tym samym kurczenie się wszystkiego, z czego składa się materia będąca w ruchu.

Tę samą koncepcję zaproponował, niezależnie od Fitzgeralda, w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku Hendrik Lorentz. Obecnie idea ta nosi nazwę skrócenia Lorentza-Fitzgeralda - zamiast bardziej, moim zdaniem, chronologicznie uzasadnionej nazwy skrócenia Fitzgeralda-Lorentza. Ale Lorentz, który między innymi otrzymał w 1902 roku Nagrodę Nobla z fizyki za prace z dziedziny elektromagnetyzmu, rozwinął koncepcję skrócenia w znacznie większym stopniu niż Fitzgerald i w 1904 roku (trzy lata po śmierci Fitzgeralda) stworzył układ równań znany obecnie jako przekształcenie Lorentza. Równania te opisują transformację - nie tylko długości, ale także innych właściwości poruszających się obiektów - między układami odniesienia (obserwatorami) poruszającymi się z różnymi prędkościami.

W gruncie rzeczy Lorentz stworzył swoje równania transformacyjne, aby matematycznie opisać, w jaki sposób pola elektromagnetyczne wyglądałyby z punktu widzenia różnych obserwatorów. Przekształcenie Lorentza włącza względne prędkości tych obserwatorów do równań Maxwella. Rok później Albert Einstein udowodnił, że te same równania transformacyjne stosują się także do układów mechanicznych, i pokazał, w jaki sposób nie tylko długość, ale także czas, prędkość, a nawet masa poruszającego się obiektu zależy od punktu widzenia różnych obserwatorów. Choć Einstein wykorzystał prace Lorentza nad elektromagnetyzmem jako punkt wyjścia konstrukcji szczególnej teorii względności, nie znał on wówczas wyników doświadczenia Michelsona-Morleya wskazujących, że prędkość światła jest zawsze taka sama. Znacznie później, odpowiadając w 1954 roku (na rok przed śmiercią) na pytanie dotyczące tej kwestii, powiedział, że eksperyment ten „nie był istotny. Nie pamiętam nawet, czy w ogóle wiedziałem o nim, gdy pisałem moją pierwszą [1905] pracę na ten temat”⁴⁵. Co zatem było dla Einsteina źródłem inspiracji do prac, które w pierwszej dekadzie dwudziestego wieku zrewolucjonizowały fizykę?

⁴⁵ Cytowane za: R. Weber, *Pioneers in Science*, s. 33.

Geniusz Einsteina

W 1905 roku Einstein miał 26 lat. W roku 1900 ukończył studia na politechnice (Eidgenössische Technische Hochschule - ETH) w Zurychu, a od 1902 pracował jako rzeczoznawca w szwajcarskim biurze patentowym w Bernie, oceniając techniczne zalety (lub ich brak) nowych wynalazków. Jego nadzieje na karierę akademicką zostały w owym czasie zniweczone, ponieważ nie potraktował dostatecznie poważnie studiów na ETH. Mimo że całkiem nieźle zdał końcowe egzaminy, w czasie studiów wyrobił sobie opinię lenia i zniechęcił do siebie niektórych profesorów, którzy mogliby znaleźć dla niego posadę. Praca w biurze patentowym była łatwa i zostawiała mu sporo czasu na rozmyślania o fizyce - w okresie od 1902 do 1905 roku opublikował kilka prac z fizyki i obronił pracę doktorską.

Historia życia i osiągnięć Einsteina wypełniłaby (i wypełniła) kilka książek, lecz tutaj skoncentrujemy się na szczególnej teorii względności i na tym, co mówi nam ona o naturze światła. Einstein był obdarzony wielką intuicją w dziedzinie fizyki, dzięki której potrafił dotrzeć do sedna problemu. Matematyka nie była jego najsilniejszym atutem, aczkolwiek z pewnością znał ją lepiej niż większość ludzi. Jednak tym, co naprawdę stanowiło o jego geniuszu, było niezwykle wyczucie fizyki. Do szczególnej teorii względności doprowadziła go intuicja, dzięki której zdał sobie sprawę z tego, co naprawdę mówią równania Maxwella.

Einstein zastanawiał się, co by się stało, gdyby ktoś potrafił poruszać się obok promienia światła z taką samą prędkością jak światło. Pamiętamy, że w równaniach Maxwella kluczowy jest fakt, iż z m i e n n e pole elektryczne generuje (zmienną) magnetyczną część fali, a z m i e n n e pole magnetyczne wytwarza (zmienną) elektryczną część fali elektromagnetycznej. Jeżeli jednak ktoś porusza się z taką samą prędkością jak fala, to z jego punktu widzenia fala nie będzie w ogóle „falować”. Będzie nieruchoma jak fala na morzu, którą zaskoczył nagły mróz i natychmiast zamienił w lód. A równania Maxwella jasno dowodzą (doświadczenie zaś pokazuje to samo), że nieruchome pole magnetyczne nie wytwarza pola elektrycznego, a nieruchome pole elektryczne nie wytwarza pola magnetycznego. W takiej sytuacji nie będzie żadnej fali - nawet zamrożonej.

W ten sposób znów wracamy do problemu względności ruchu. Newton doskonale zdawał sobie sprawę z tego, że ruch jest względny. Mimo że w sytuacjach takich, jak spacer człowieka po powierzchni Ziemi, lot ptaka w powietrzu czy rejs statkiem po morzu względność ruchu jest rzeczą oczywistą, Newton sądził, że musi istnieć jakiś uniwersalny układ odniesienia (uniwersalny wzorzec spoczynku), względem którego można mierzyć wszelki ruch. Idea ta doskonale harmonizowała z koncepcją eteru, który w gruncie rzeczy byłby fizyczną realizacją tego uniwersalnego układu. Newton uważał również, że istnieje absolutny wzorzec czasu, swego rodzaju boski zegar, nieubłaganie odliczający sekundy w jednakowym tempie dla każdego. Tych niewątpliwie sensownych pomysłów nie da się jednak pogodzić z równaniami Maxwella.

Einstein zauważył, że we wszechświecie w ogóle nie ma potrzeby istnienia żadnego wyróżnionego układu odniesienia, względem którego mierzyłoby się prędkości. Zamiast tego wystarczy powiedzieć, że w s z e l k i ruch jest względny - co oznacza, że każdy ma prawo do

stwierdzenia, iż jest w spoczynku, i mierzenia prędkości innych ciał względem własnego układu odniesienia. Ściśle rzecz biorąc, ta względność ruchu dotyczy tylko obserwatorów poruszających się względem siebie ze stałymi prędkościami i wzdłuż linii prostych. Każdy, kto znajduje się w przyspieszającym układzie odniesienia, może to łatwo stwierdzić na podstawie działających na niego sił - w momencie, gdy winda zatrzymuje się lub gdy rusza z miejsca, pasażerowie odnoszą wrażenie, że ich waga nagle się zmienia, a pasażerowie pojazdu poruszającego z dużą prędkością odczuwają na zakręcie siłę popychającą ich na zewnątrz łuku. To ograniczenie stanowi przyczynę, dla której teoria ma w nazwie słowo „szczególna”. Ogólna teoria względności Einsteina rozszerzyła koncepcję względności na ruch przyspieszony, ruch wzdłuż zakrzywionego toru i na grawitację, lecz, na szczęście, do omówienia problemów, o których mówi ta książka, w ogóle nie potrzebujemy ogólnej teorii względności.

Fale elektromagnetyczne, z których składa się promień światła, ani nie znają prędkości, z jaką porusza się źródło fal, ani nie troszczą się o nią⁴⁶. Gdy tylko zostaną wytworzone, poruszają się w przestrzeni z prędkością c , określoną przez równania Maxwella.

Jeżeli wszyscy obserwatorzy poruszający się z ustalonymi prędkościami (poruszający się ruchem jednostajnym po prostej - w żargonie fizyków są to obserwatorzy inercjalni) mają prawo powiedzieć, że są w spoczynku, i mierzyć wszystkie ruchy względem własnego układu odniesienia, to znaczy że we wszystkich tych układach muszą obowiązywać takie same prawa fizyki. Jeżeli przeprowadzę eksperyment na statku kosmicznym poruszającym się z prędkością równą trzem czwartym prędkości światła względem Ziemi, to muszę uzyskać takie same „odpowiedzi” jak obserwator, którego statek porusza się z prędkością równą połowie prędkości światła względem Ziemi. Gdyby „odpowiedzi” były różne, to wiedzielibyśmy, kto z nas „rzeczywiście” się poruszał, a kto nie.

Jak należy zatem zmodyfikować newtonowski opis rzeczywistości, aby mieć pewność, że wszyscy inercjalni obserwatorzy uzyskają takie same wyniki swoich eksperymentów fizycznych? Einstein znalazł odpowiedź, wyobrażając sobie, jak wyglądałby impuls promieniowania elektromagnetycznego rozchodzący się ze źródła światła z punktu widzenia obserwatorów poruszających się z różnymi prędkościami względem źródła. W układzie odniesienia związanym ze źródłem impuls tworzy sferyczną powłokę powiększającą się w przestrzeni. Zatem z punktu widzenia wszystkich inercjalnych obserwatorów impuls ten musi wyglądać jak sferyczna powłoka, gdyż w przeciwnym wypadku wiedzieliby oni, że się poruszają. Jest to możliwe tylko wtedy, gdy ich przyrządy pomiarowe kurczą się na skutek ruchu względem źródła światła. Skrócenie to jest dokładnie takie, jakie przewiduje hipoteza Lorentza-Fitzgeralda, można je wyliczyć za pomocą przekształcenia Lorentza. Jest jednak jeszcze coś - prędkości nie dodają się tak, jak powinny się dodawać, gdyby obowiązywały zdroworozsądkowe zasady mechaniki newtonowskiej.

⁴⁶ Ta niezależność od prędkości źródła promieniowania jest prawdą tylko w odniesieniu do prędkości światła. Częstotliwość i długość fali są zależne od ruchu źródła, co jest widoczne w tak zwanym zjawisku Dopplera (przyp. tłum.).

Jeżeli obok mnie przeleci statek kosmiczny poruszający się z prędkością trzech czwartych prędkości światła ($0,75c$) i drugi taki statek lecący z taką samą prędkością, ale w przeciwnym kierunku, to prędkość pierwszego statku względem drugiego wynosi półtora prędkości światła ($1,5c$), zgodnie ze zdroworozsądkowymi zasadami mechaniki newtonowskiej. Jednak stosując transformację Lorentza albo po prostu mierząc prędkość jednego statku z pokładu drugiego, uzyskamy wynik $0,96c$. Co więcej, jeżeli pasażer jednego ze statków zapali światło, a obserwatorzy na każdym statku zmierzą prędkość tego impulsu fali elektromagnetycznej, to uzyskają wynik c , a nie $1,75c$. W transformacji Lorentza nie ma w istocie możliwości dodania dwu prędkości mniejszych niż c i uzyskania w wyniku wartości równej c lub większej. Oznacza to między innymi, że jeżeli wystartuję z prędkością mniejszą niż c i będę systematycznie przyspieszał (czyli coraz bardziej zwiększał swoją prędkość chwilową), to nigdy nie będę w stanie osiągnąć c .

Zawsze mogę przyspieszyć względem jakiegoś wybranego układu odniesienia - od $0,9c$ do $0,99c$, od $0,99c$ do $0,999c$ i tak dalej - ale nigdy nie osiągnę prędkości światła. Jednak gdy zmierzę prędkość samego światła (względem mojego własnego układu odniesienia), zawsze uzyskam wynik c .

Jest to jedna z kluczowych właściwości, na których opiera się najlepsze wytłumaczenie kwantowych tajemnic, więc warto ją sobie dobrze przyswoić:

Szczególne teorie względności mówią nam, że nie jest możliwe poruszanie się wzdłuż kierunku promienia światła z taką samą prędkością, z jaką biegnie światło. Względem jakiegoś ustalonego układu odniesienia można uzyskać prędkość dowolnie bliską prędkości światła, ale nie równą. Jednak jakkolwiek bliska c będzie nasza prędkość, gdy zmierzmy prędkość samego promienia światła, zawsze uzyskamy wartość c .

Ze szczególnej teorii względności wynika wiele fascynujących wniosków i konsekwencji, na omówienie których nie ma zbyt wiele miejsca w niniejszej książce. Teoria ta mówi między innymi, że przestrzeń i czas są zespolone w jedną całość - czasoprzestrzeń, a także że masa i energia są sobie równoważne - zgodnie ze słynnym równaniem $E = mc^2$. W naszej dyskusji okaże się, że dla poruszającego się zegara czas biegnie wolniej. W szczególnej teorii względności nie istnieje boski zegar, który wyznaczałby absolutny, wspólny dla wszystkich obserwatorów czas.

Efekt ten, zwany dylatacją czasu, rządzi - podobnie jak skróceniem Lorentza-Fitzgeralda - przekształcenie Lorentza. Aby go sobie wyobrazić, wykorzystamy koncepcję czasoprzestrzeni, którą wprowadził w 1908 roku Hermann Minkowski, jeden z wykładowców Einsteina w ETH. Zaproponował on, aby uważać czas za czwarty wymiar, traktując „wprzód/wstecz” w czasie na równi z „wprzód/wstecz” w przestrzeni, podobnie jak „lewo/prawo” i „górze/dół”: Jedną jedyną różnicą polega na tym, że czas pojawia się w odpowiednich równaniach z przeciwnym znakiem niż wymiary przestrzenne - w konwencjonalnym ujęciu czas ma znak „-”, a wymiary przestrzenne znak „+”, aczkolwiek równania byłyby równie prawidłowe przy odwrotnym układzie znaków. W rezultacie

ruch powoduje skrócenie długości i wydłużanie przedziałów czasowych. Te dwa efekty nawzajem się bilansują, więc skrócenie poruszającego się przedmiotu dokładnie kompensuje wydłużenie jego czasu.

Fizycy posługują się pojęciem czterowektora, który stanowi pewnego rodzaju czterowymiarowy odpowiednik długości i który ma tę właściwość, że pozostaje niezmienny i niezależny od tego, czy i jak dany przedmiot się porusza. Od ruchu przedmiotu (lub od ruchu obserwatora względem przedmiotu) zależy jednak to, w jaki sposób czterowektor jest podzielony między długość i czas.

Powracając na moment do konwencjonalnej trójwymiarowej przestrzeni Galileusza i Newtona, możemy zobaczyć coś podobnego do relatywistycznego skrócenia długości, jeżeli będziemy trzymać ołówek w świetle lampy i obserwować na podłodze jego cień. W zależności od pochylenia ołówka cień może mieć dowolną długość, począwszy od zera aż do rzeczywistej długości ołówka, która oczywiście jest zawsze taka sama. Ruch z jednostajną prędkością w trójwymiarowej przestrzeni jest matematycznie równoważny różnym orientacjom poruszającego się obiektu w czterowymiarowej czasoprzestrzeni. Różne długości cienia są równoważne różnym wartościom Lorentzowskiego skrócenia, natomiast czas podlega wydłużeniu (dylatacji) o odpowiednio dużą wartość. Trójwymiarowy świat wokół nas jest w gruncie rzeczy cieniem padającym z czterowymiarowej czasoprzestrzeni.

Żaden z powyższych efektów nie jest widoczny, dopóki prędkości rozważanych obiektów nie będą wystarczająco duże w stosunku do prędkości światła. Jednak podkreślmy raz jeszcze, że efekty te istnieją i zachodzą dokładnie tak, jak przewiduje teoria Einsteina. Szczególna teoria względności została zweryfikowana w wielu eksperymentach na wiele różnych sposobów i przeszła pomyślnie wszystkie testy. Przykładem niech będzie choćby tylko klasyczny przypadek dylatacji czasu.

Atmosfera Ziemi jest cały czas bombardowana przez cząstki zwane promieniowaniem kosmicznym. Cząstki te zderzają się z atomami atmosfery wysoko nad powierzchnią Ziemi, dosyć często dając w wyniku lawinę (zwaną wtórnym promieniowaniem kosmicznym) innego rodzaju cząstek, zwanych mionami. Miony mają bardzo krótki czas życia i po kilku mikrosekundach „rozpadają się” na jeszcze inne rodzaje cząstek. Pomimo dużych prędkości, z jakimi podróżują, miony nie żyją wystarczająco długo - zgodnie z naszymi zdroworozsądkowymi poglądami na upływ czasu - aby przedostać się przez atmosferę i dotrzeć do powierzchni Ziemi. Mimo to fizycy cząstek elementarnych obserwują znaczną liczbę mionów przy powierzchni Ziemi. Wyjaśnienie polega na tym, że miony poruszają się na tyle szybko względem Ziemi, iż czas biegnie dla nich wolniej. Szczególna teoria względności mówi, że czas życia mionów jest dłuższy o czynnik 9 - żyją one 9 razy dłużej, zgodnie z naszymi zegarami, niż żyłyby, gdyby się nie poruszały.

Szczególna teoria względności mówi jednak także, iż każdy mion ma prawo uważać się za nieruchomy. Czy zatem, we własnym układzie odniesienia, mion musi się rozpaść, zanim dotrze do powierzchni Ziemi? W żadnym razie! Jeżeli mion znajduje się w spoczynku, to musimy uwzględnić fakt, że Ziemia porusza się względem jego (mionu) układu odniesienia z odpowiednio

dużą prędkością. Z punktu widzenia mionu Ziemia ulega zatem skróceniu o wielkość wyznaczoną przez przekształcenie Lorentza. Ze względu na fakt, że prędkość w obu wypadkach jest taka sama, oraz ze względu na symetrię pomiędzy przestrzenią i czasem w tych równaniach czynnik skrócenia długości jest taki sam jak czynnik dylatacji czasu i wynosi 9. W równaniach tych czas występuje z przeciwnym znakiem niż wymiary przestrzenne, więc grubość atmosfery ziemskiej kurczy się o czynnik 9, z punktu widzenia mionów. Muszą one przebyć dystans dziewięciokrotnie mniejszy niż to, co my mierzymy w układzie odniesienia związanym z Ziemią - ich czas życia okazuje się wystarczający do pokonania tej odległości.

Szczególna teoria względności nie jest bynajmniej jakąś szaloną hipotezą. Spełnia ona doświadczalny test Newtona - „wyjaśnia właściwości rzeczy”, a także „dostarcza eksperymentów”, które mogą zostać użyte do testowania tych wyjaśnień.

Co się więc stanie, jeżeli spróbujemy posunąć się do samej granicy? Wracając do pierwotnego pytania Einsteina: Jak wygląda wszechświat z punktu widzenia promienia światła (lub - jeśli ktoś woli - z punktu widzenia fotonu) lub kogoś, kto jedzie na wiązce światła jak na koniu? W jaki sposób płynie czas dla fotonu?

Odpowiemy najpierw na drugie pytanie - dla fotonu czas w ogóle nie płynie. Przekształcenie Lorentza mówi nam, że czas stoi nieruchomo dla obiektu poruszającego się z prędkością światła. Można też powiedzieć, że z punktu widzenia fotonu wszystko porusza się z prędkością światła, a w takiej ekstremalnej sytuacji skrócenie Lorentza-Fitzgeralda redukuje wszystkie odległości do zera. Możemy powiedzieć, że dla fali elektromagnetycznej czas nie istnieje, czyli fala istnieje równocześnie we wszystkich punktach (całej) trajektorii, albo że nie istnieje odległość, czyli fala natychmiast dociera do wszystkich miejsc we wszechświecie. Są to równoważne sformułowania tego samego faktu.

Jest to niezwykle ważna przesłanka, do której jednak nie przywiązuje się należytej wagi. Z punktu widzenia fotonu nie potrzeba w ogóle czasu, aby przebyć odległość 150 milionów kilometrów od Słońca do Ziemi (lub przebiec cały wszechświat), z tego prostego powodu, że ten przedział przestrzenny nie istnieje dla fotonu. Fizycy zdają się nie zważać na ten zadziwiający stan rzeczy, ponieważ wiedzą, że żaden materialny obiekt nie może zostać przyspieszony do prędkości światła, więc żaden ludzki (lub mechaniczny) obserwator nigdy nie zaobserwuje tego dziwnego zjawiska. Być może są oni po prostu tak oszołomieni tym, co mówią równania, że nie w pełni zdają sobie sprawę z konsekwencji. Mam jednak nadzieję, że uda mi się przekonać czytelnika, iż to dziwne zachowanie przestrzeni i czasu może pomóc rozwikłać w s z y s t k i e zagadki fizyki kwantowej. Jednak zanim zobaczymy, jak wygląda współczesny opis zjawisk elektromagnetycznych, powstający dzięki współdziałaniu szczególnej teorii względności i mechaniki kwantowej, warto poznać jeszcze jedną konsekwencję teorii Einsteina. Jej równania mówią nam, że w wyniku dodawania dwóch (lub więcej!) prędkości mniejszych od prędkości światła c nie można uzyskać względnej prędkości większej od c , ale n i e mówią, że sama podróż z prędkością większą od c jest niemożliwa.

Szybciej niż światło/wstecz w czasie

Jak już wspomniałem w prologu, szczególna teoria względności nie mówi, że nie jest możliwe poruszanie się z prędkością większą od światła, lecz jedynie, że nie jest możliwe przekroczenie „bariery” prędkości światła. Jeżeli cząstka porusza się wolniej od światła, to przyspieszenie jej do prędkości równej dokładnie c wymagałoby nieskończonej ilości energii. Jednak równania Einsteina mają pewną piękną właściwość - w opisie ruchu wykazują symetrię, której środkiem jest prędkość światła. Gdyby istniała cząstka poruszająca się z prędkością większą od prędkości światła, to z a w s z e miałaby ona prędkość większą od światła. Po drugiej stronie bariery światła s p o w o l n i e n i e cząstki do prędkości światła wymagałoby nieskończonej ilości energii.

Równania dopuszczają istnienie takich szybszych od światła cząstek, więc nazwano je - tachionami, od greckiego słowa oznaczającego „szybki” (niektórzy fizycy mówią, z odrobiną ironii, że zwykle, wolniejsze od światła cząstki także zasługują na miano i nazywają je tardonami⁴⁷). Jeżeli tachiony istnieją, to zamieszkują bardzo dziwny świat, w którym prawa fizyki są „lustrzanym odbiciem” praw znanych z naszego świata. Symetria równań względem prędkości światła oznacza, że w pewnym sensie odpycha ona cząstki znajdujące się po obu stronach, podobnie jak nieskończenie długie i nieskończenie wysokie zbocze góry. Cząstki znajdujące się po naszej stronie góry, pozostawione same sobie, staczają się do mniejszych prędkości, natomiast cząstki po drugiej stronie staczają się do nieskończonej prędkości, chyba że dostaną porcję energii. Ponieważ czas biegnie coraz wolniej, gdy zbliżamy się („wspinamy się po zboczu góry”) do prędkości światła od naszej strony, aż w końcu się zatrzymuje, gdy osiągamy tę prędkość, nie powinno być dla nikogo zaskoczeniem, że czas biegnie powoli w s t e c z zaraz po drugiej stronie bariery, a im szybciej tachion się porusza (im dalej się „stacza ze zbocza” po drugiej stronie góry - czyli im dalej od bariery prędkości światła), tym szybciej wstecz biegnie dla niego czas.

Gdy tachion traci energię, to porusza się coraz szybciej przez przestrzeń i (wstecz) przez czas. Tak więc los tachionu powstałego w wyniku jakiegoś oddziaływania cząstek (na przykład zderzenia promienia kosmicznego z atmosferą Ziemi) polegałby na wypromieniowaniu całej jego energii w krótkotrwałym błysku, w trakcie niezwykle szybkiego przyspieszenia do fantastycznej prędkości i błyskawicznej ucieczki na drugi koniec wszechświata.

Jest bardzo mało prawdopodobne, by takie cząstki rzeczywiście istniały. Ale nawet najbardziej znikoma szansa odkrycia czegoś tak podniecająco egzotycznego jest warta ryzyka, podobnie jak kupno biletu na loterię dające szansę wygrania głównej nagrody, więc niektórzy fizycy szukali śladów tachionów wśród cząstek wtórnego promieniowania kosmicznego (co zresztą jeszcze bardziej redukuje szansę wygrania nagrody, zważywszy na fakt, że używali oni detektorów zbudowanych do bardziej konwencjonalnych zadań). „Ślad” tachionu byłby zdarzeniem zarejestrowanym przez detektor na powierzchni Ziemi tuż p r z e d powstaniem wtórnego promieniowania kosmicznego w wyniku trafienia cząstki kosmicznej w górną warstwę atmosfery.

⁴⁷ Od ang.: *tardy* - powolny, leniwy, spóźniony (przyp. tłum.).

Jakikolwiek tachion powstały w wyniku tego trafienia podróżowałyby wstecz w czasie po drodze w dół do detektora!

Niestety (dla entuzjastów fantastyki naukowej, a także dla fizyków, którzy z pewnością zdobyliby Nagrodę Nobla, gdyby udało im się złapać tachion) eksperymenty takie nie dostarczyły dowodów na istnienie tachionów. Hipoteza istnienia tachionów jest nadal istotna tylko dlatego, że pokazuje ona, iż równania teorii względności nie wykluczają możliwości istnienia obiektów podróżujących wstecz w czasie. Nikt nie sugeruje, że materialne cząstki - tachiony - powstają w chwili, gdy inteligentne istoty gdzieś we wszechświecie otwierają kapsułę i stwierdzają, czy kotek jest żywy czy martwy, w wyniku czego cząstki te podróżują wstecz w czasie, aby dokonać redukcji „pierwotnej” funkcji falowej elektronu (niezależnie od wszystkiego tworzenie cząstek, także tachionów, wymaga energii w ilości mc^2). Jeżeli jednak prawa fizyki dopuszczają w jakiegokolwiek formie komunikację wstecz w czasie, to musimy uwzględnić tę możliwość w naszych rozważaniach nad losem podróżujących w przestrzeni kotków, a także możliwość działania na odległość.

Jak stwierdziłem w mojej książce *In Search of the Edge of Time* [W poszukiwaniu krawędzi czasu], żadne prawo fizyki (łącznie z ogólną, a nie tylko szczególną teorią względności) nie zabrania podróży w czasie. Podróż taka byłaby niezwykle trudna i, co więcej, sprzeczna ze zdrowym rozsądkiem. Jednak nie byłaby ona sprzeczna z prawami fizyki, a zdrowy rozsądek zebrał już zdrowe cięgi zarówno od teorii względności, jak i od mechaniki kwantowej - w obu wypadkach podstawą wyroku była eksperymentalna weryfikacja, której merytoryczną zasadność zaakceptowałby sam Newton.

Nie będę dalej rozwijał tych zagadnień, ale zachowajmy je w pamięci, gdyż przydadzą się później. Dzięki temu pewne rzeczy, o których opowiem pod koniec tej książki, nie będą aż tak bardzo szokujące. Na razie wróćmy do światła, a raczej do związków między elektromagnetyzmem a fizyką kwantową.

Wkracza foton

Pod koniec dziewiętnastego stulecia falowa teoria światła była już tak powszechnie przyjęta, że niemal herezją byłaby sugestia, iż światło mogłoby zachowywać się jak cząstka. Okazało się jednak, że dokładnie to było potrzebne, aby wytłumaczyć właściwości światła. Fizycy zaakceptowali (na ile jest to w ogóle możliwe) koncepcję fotonu oraz dualizm falowo-korpuskularny dopiero w latach dwudziestych.

Pierwszy krok uczynił Max Planck, urodzony w 1858 roku niemiecki fizyk, który w 1892 roku został profesorem fizyki w Instytucie Fizyki Teoretycznej w Berlinie. W drugiej połowie lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku Planck dokonał heroicznego wysiłku, aby wyjaśnić, w jaki sposób gorące przedmioty emitują promieniowanie elektromagnetyczne, łącznie ze światłem. Podobnie jak inni współcześni mu fizycy Planck zmagał się z wielką zagadką. Zgodnie z klasycznymi prawami ruchu falowego - które wspaniale opisują wibracje struny gitarowej oraz ruch fal na powierzchni jeziora - naładowane cząstki powinny łatwiej wypromieniowywać energię w formie drgań o wysokich częstościach (które odpowiadają małym długościom fali). Wewnątrz

gorącego przedmiotu (takiego na przykład jak włókno żarówki) znajdują się naładowane cząstki (elektrony), zygakujące tam i z powrotem z prędkością, która zależy od temperatury tego przedmiotu. Zgodnie z prawami klasycznej fizyki każdy gorący przedmiot powinien intensywnie emitować promieniowanie w krótkofalowej części widma (ultrafiolet, promienie X i tak dalej), a bardzo słabo w długofalowej (promieniowanie widzialne, podczerwone i radiowe). Jednak żadna normalna żarówka z całą pewnością nie promieniuje dużych ilości promieni X, gdyż w przeciwnym razie mało kto pozostałby przy życiu, żeby czytać te słowa. W rzeczywistości każdy gorący przedmiot promieniuje najsilniej w obszarze wokół pewnej charakterystycznej częstości, która zależy od jego temperatury. Słońce jest żółte, ponieważ jego temperatura wynosi około 6000 stopni, a żółty kolor jest najsilniej wypromieniowywany właśnie w tej temperaturze. Rozgrzany do czerwoności pogrzebacz jest nieco chłodniejszy od Słońca, więc promieniuje najsilniej w obszarze nieco dłuższych fal - w czerwonej części widma. Związek między temperaturą i charakterystyczną częstością promieniowania jest znany jako prawo promieniowania ciała doskonale czarnego, a samo promieniowanie jako promieniowanie ciała doskonale czarnego („czarnego” dlatego, że te same reguły stosują się przy absorpcji promieniowania przez czarną powierzchnię - ponownie w równaniach pojawia się symetria).

Po wielu wcześniejszych bezowocnych próbach w 1900 roku Planck znalazł w końcu rozwiązanie zagadki. Zdał sobie sprawę, iż naturę promieniowania ciała doskonale czarnego wyjaśnia założenie, że gorące przedmioty nie mogą w istocie promieniować dowolnej ilości energii elektromagnetycznej. Energia ta jest natomiast emitowana (lub absorbowana, zależnie od kierunku, w którym biegają odpowiednie równania) w mających określone rozmiary porcjach, które Planck nazwał kwantami. Każda taka porcja (paczka falowa) niesie pewną ilość energii, która zależy od częstości (energia paczki jest równa częstości pomnożonej przez pewną liczbę, obecnie znaną jako stała Plancka). Zobaczmy, w jaki sposób powyższa hipoteza pozwala wyjaśnić naturę promieniowania ciała doskonale czarnego.

Częstość, z jaką oscylują elektrony znajdujące się wewnątrz rozgrzanego przedmiotu, zależy od temperatury, lecz nie oznacza to, że poruszają się one z dokładnie taką samą prędkością. Większość oscyluje z pewną średnią częstością, lecz niektóre mają nieco większą energię i poruszają się szybciej, a energia innych jest nieco mniejsza od średniej, w wyniku czego są one wolniejsze. Zawsze istnieje pewien rozrzut energii wokół wartości średniej, podobnie jak rozrzut wzrostu dzieci w jednej klasie wokół przeciętnej wartości. Dla bardzo dużych częstości energia potrzebna do wyemitowania jednego kwantu jest odpowiednio duża i bardzo niewielka liczba cząstek (elektronów oscylujących wewnątrz promieniującego ciała) będzie miała tyle energii, że stworzy taki kwant, więc liczba krótkofalowych kwantów będzie odpowiednio niewielka. Dla bardzo małych częstości znaczna liczba elektronów będzie dysponować energią niezbędną do wyemitowania odpowiedniego promieniowania, ale będą to kwanty o małej energii i nawet ich łączna energia nie będzie znacząca. Tylko w środku, w okolicy częstości odpowiadającej temperaturze danego ciała, znajdzie się duża liczba elektronów zdolnych do wyemitowania kwantu

o energii odpowiadającej danej częstotliwości. To właśnie połączona energia tych kwantów decyduje o kolorach, w jakich świecą rozgrzane ciała.

Ogłoszenie przez Plancka w grudniu 1900 roku tego odkrycia jest uważane za początek rewolucji kwantowej. Jednak Planck nie stwierdził, że światło może istnieć jedynie w formie maleńkich cząstek - kwantów. Sądził, że to raczej jakaś właściwość elektrycznie naładowanych cząstek jest odpowiedzialna za emisję (lub absorpcję) energii elektromagnetycznej w określonej wielkości porcjach, natomiast samo światło (i inne formy promieniowania elektromagnetycznego) istnieje jako klasyczna fala.

Aczkolwiek obliczenia Plancka pozwoliły prawidłowo opisać emitowane przez gorące ciała promieniowanie elektromagnetyczne, większość ludzi, łącznie z samym Planckiem, nie bardzo wiedziała, jak należy je zinterpretować, aby zrozumieć, co rzeczywiście się dzieje. Planck dopiero w 1918 roku otrzymał Nagrodę Nobla za swoją pracę i, jak na ironię, nigdy nie pogodził się z teorią kwantową, mimo że dożył 1947 roku. Dalszy postęp był w dużej mierze konsekwencją teoretycznych prac Alberta Einsteina (otrzymał za nie Nagrodę Nobla w 1921 roku) oraz doświadczeń Roberta Millikana (który Nagrodę Nobla dostał w 1923 roku).

Z początkiem dwudziestego wieku jedynie Einstein miał odwagę, aby uznać fizyczną realność kwantów Plancka. W publikacji, która ukazała się w 1905 roku, wyjaśnił zjawisko znane pod nazwą zjawiska fotoelektrycznego - w jaki sposób elektrony są wybijane z powierzchni metalu przez światło na skutek zderzenia cząstek światła (kwantów) z elektronami w metalu. Każdy kwant niesie określoną ilość energii, która zależy jedynie od częstotliwości (czyli w przypadku światła widzialnego od koloru). Zatem dla czystego światła określonego koloru wszystkie elektrony wybite z powierzchni metalu niosą taką samą energię. Eksperymentatorzy głowili się nad tym odkryciem od 1899 roku, a gdy w końcu Einstein je wyjaśnił, doskonale zdawał sobie sprawę z rewolucyjnego charakteru swojej hipotezy. Z początku prawie nikt nie potraktował jej poważnie i nawet jeszcze w 1911 roku, na pierwszym Kongresie SoWaya, sam Einstein stwierdził: „Upieram się przy prowizorycznym charakterze tej koncepcji, gdyż nie wydaje się ona do pogodzenia z eksperymentalnie zweryfikowanymi konsekwencjami teorii falowej”⁴⁸. Problem polegał na tym, że nawet Einstein rozumował w kategoriach albo/albo. Albo światło jest falą, albo cząstką. Dowody na falową naturę światła muszą wykluczyć hipotezę korpuskularną, dowody na rzecz cząstek muszą wykluczyć hipotezę falową. Przecież obie hipotezy nie mogą być słuszne!

Millikan (1868-1953), który w okresie pierwszego Kongresu SoWaya pracował na University of Chicago, całkowicie podzielał to przekonanie, a zarazem uważał, że pogląd, jakoby światło było strumieniem cząstek, jest nonsensem. Aby to udowodnić, przeprowadził serię błyskotliwie zaprojektowanych i wykonanych doświadczeń nad zjawiskiem fotoelektrycznym, w wyniku których musiał w 1915 roku przyznać - wbrew swoim przekonaniom - że Einstein miał rację i że wszystkie dowody wskazują na fizyczną realność kwantów światła. Przy okazji pierwszy wyznaczył dokładną

⁴⁸ Por. J. Gribbin, *W poszukiwaniu kota Schrodingera*, s. 82 i n.

wartość stałej Plancka oraz zmierzył z wielką precyzją ładunek elektronu. Mimo że nadal nikt nie rozumiał, jakie znaczenie ma pojęcie kwantu, doświadczalne dowody jego istnienia były niepodważalne i posypały się Nagrody Nobla, poczynając od Plancka. W 1923 roku, gdy Millikan otrzymał swoją, koncepcja kwantu była już w pełni uznana, lecz określenie „foton” (gr. *photos* - światło) pojawiło się dopiero w 1926 roku - za sprawą Gilberta Lewisa, fizyka z Berkeley - tuż po tym, jak odkryty został mechanizm zachowania cząstek światła, co z kolei doprowadziło do stworzenia mechaniki kwantowej.

Człowiek, który nauczył Einsteina liczyć fotony

Indyjski fizyk, Satyendra Nath Bose z uniwersytetu w Dhace (w owym czasie leżącej w Bengalu Wschodnim), utorował drogę do mechaniki kwantowej oraz teorii światła i materii, pokazując, że jeden plus jeden niekoniecznie daje w wyniku dwa. Na początku lat dwudziestych Bose stworzył matematyczny opis kwantów światła, dzięki czemu z wielu oderwanych koncepcji i idei tworzących w owym czasie kwantową teorię promieniowania powstała spójna całość. Rok 1994 był rokiem potrójnej rocznicy: Satyendra Bose urodził się sto lat wcześniej - 1 stycznia 1894 roku w Kalkucie; zmarł w wieku 80 lat - 4 lutego 1974 roku również w Kalkucie; jego największe odkrycie zostało opublikowane w 1924 roku, gdy miał 30 lat.

Gdy tuż przed końcem ubiegłego stulecia Planck wprowadził ideę kwantyzacji do dyskusji nad oddziaływaniem promieniowania i materii, zastosował ją *ad hoc* do wyjaśnienia właściwości promieniowania ciała doskonale czarnego. Mimo że w 1905 roku Einstein zasugerował, że samo światło musi zostać skwantowane (a późniejsze eksperymenty Millikana pokazały, że Einstein miał rację), jeszcze na początku lat dwudziestych wielu fizyków - prawdopodobnie większość - w istocie nie wierzyła, że światło istnieje w postaci cząstek. Nie jest dziełem przypadku, że cząstka światła uzyskała odrębną nazwę, „foton”, dopiero w 1926 roku, po tym, jak Bose stworzył solidne matematyczne podstawy kwantowej teorii światła.

Planck rozwiązał problem promieniowania ciała doskonale czarnego, dzieląc (matematycznie) elektromagnetyczną energię na małe kawałki. Zwróćmy uwagę, że Planck nie sądził, aby te kawałki miały jakiegokolwiek fizyczne znaczenie, lecz uważał, że jakiś mechanizm wewnątrz promieniującego gorącego ciała powoduje emisję promieniowania wyłącznie w porcjach o określonych rozmiarach. Przypomina to wodę kapiącą z uszkodzonego kranu do wanny - zarówno w rurach, jak i w wannie woda istnieje jako ciągła amorficzna ciecz, lecz fizyczne właściwości ciekącego kranu powodują, że woda kapie w postaci kropli o określonych rozmiarach.

Podobnie jak w przypadku ciekącego kranu, w zaproponowanym przez Plancka opisie promieniowania ciała doskonale czarnego za powstawanie „kropli” o określonych rozmiarach odpowiedzialny jest mechanizm emisji (lub absorpcji). Nie było wówczas sugestii, nawet ze strony samego Plancka, że światło lub inne formy promieniowania elektromagnetycznego mogą w rzeczywistości istnieć wyłącznie w postaci małych porcji - kwantów. W 1931 roku, w liście do R.V. Wooda, Planck wspominał, że „[kwantowanie] było założeniem czysto formalnym, do którego nie

przywiązywałem szczególnej uwagi, dążąc za wszelką cenę do uzyskania poprawnego wyniku"⁴⁹. Na początku lat dwudziestych niemal każdy wiedział, że za pomocą „kwantu światła” można wytłumaczyć dziwne cechy oddziaływania materii z promieniowaniem, lecz prawie nikt nie wierzył, że jest to coś więcej niż matematyczny chwyt. Wszyscy nadal uważali, że w rzeczywistości światło jest falą, której zachowaniem rządzą prawa Maxwella.

Z jednym wyjątkiem - fizycy w Indiach potraktowali kwant światła poważnie. Meghnad Saha, jeden z pionierów astrofizyki, użył koncepcji kwantu do opisu ciśnienia promieniowania w publikacji, która ukazała się w 1919 roku w „Astrophysical Journal”, a następnie wspólnie z Bosem przetłumaczył na język angielski prace Einsteina dotyczące ogólnej teorii względności. W trakcie tej pracy Bose zdał sobie sprawę, że prawo Plancka, dotyczące promieniowania ciała doskonale czarnego, nadal wymaga poprawnego wyprowadzenia, pozbawionego sprzeczności wynikających nieuchronnie ze sposobu, w jaki Planck wpisał niezbędny element kwantowej ziarnistości w klasyczną fizykę ciągłych fal. Bose odkrył, że sprzeczności te da się usunąć, pod warunkiem że cząstkami światła rządzi inny rodzaj statystyki niż ta, do której jesteśmy przyzwyczajeni.

Szczególną cechą pracy Bosego był fakt, że brak w niej opisu promieniowania elektromagnetycznego w kategoriach falowych, i w ogóle elektromagnetyzmu. Bose otrzymał równanie Plancka, wychodząc z założenia, że fotony można potraktować jako gaz cząstek wypełniających pewien obszar, a ich zachowaniem rządzi inne prawo statystyczne niż to, które działa w makroskopowym świecie.

Wyobraźmy sobie parę świeżo wypuszczonych z mennicy identycznych monet. Wykonajmy rzut obiema monetami. W wyniku uzyskamy jeden z trzech możliwych rezultatów: orzeł-orzeł, reszka-reszka lub orzeł i reszka. Na pierwszy rzut oka mogłoby się wydawać, że wszystkie trzy wyniki są jednakowo prawdopodobne, czyli że prawdopodobieństwo otrzymania na przykład kombinacji orzeł-reszka wynosi jedna trzecia. Wystarczy jednak chwila namysłu, aby się przekonać, że tak nie jest.

Oznaczmy w jakiś sposób obie monety, tak żeby można je odróżnić (lub użyjmy dwu różnych monet). Teraz łatwo zauważyć, że wprawdzie istnieje tylko jeden sposób na otrzymanie kombinacji orzeł-orzeł, a także jeden sposób na uzyskanie kombinacji reszka-reszka, lecz mamy dwa sposoby uzyskania kombinacji orzeł-reszka (możemy je nazwać orzeł-reszka i reszka-orzeł). K a ż d a z dwu monet może dać orła, pod warunkiem że ta druga upadnie reszka do góry. Zatem prawidłowy sposób liczenia możliwych wyników rzutu dwoma monetami musi uwzględnić c z t e r y rezultaty: orzeł-orzeł, reszka-reszka, orzeł-reszka, reszka-orzeł. Szansa uzyskania któregośkolwiek z nich wynosi jedna czwarta, a nie jedna trzecia. Ponieważ można na dwa sposoby uzyskać kombinację orła i reszki, szansa uzyskania takiego wyniku wynosi jedna druga, czyli 50% (jedna czwarta plus jedna czwarta). Istotną rzeczą jest fakt, że nie da się odróżnić rezultatu orzeł-reszka od rezultatu reszka-orzeł, jeżeli monety są identyczne. Jeżeli jednak cząstki są rzeczywiście

⁴⁹ Cytowane przez Dipankara Home'a, „New Scientist”, 8 stycznia 1994.

odróżnialne (nie dlatego, że je oznaczyliśmy, lecz ze względu na ich wewnętrzne właściwości), to statystyka jest inna. Mamy wtedy cztery różne wyniki rzutu dwiema monetami, każdy z jednakowym prawdopodobieństwem równym jedna czwarta. Nie zagłębiając się w szczegóły, możemy na tym prostym przykładzie przekonać się, że rozkłady statystyczne są rzeczywiście różne w zależności od tego, czy cząstki są czy nie są rozróżnialne. Innymi słowy, statystyka, którą musimy się posłużyć do opisu zachowania dużej liczby wzajemnie oddziałujących cząstek, zależy od gatunku cząstek, z którymi mamy do czynienia.

Bose odkrył, że można wyprowadzić wzór Plancka, jeżeli się potraktuje fotony jako cząstki, które muszą być liczone w pewien szczególny sposób. Fotony są nieodróżnialne (to tylko jedna z istotnych właściwości fotonów, lecz nie będziemy tutaj uwzględniać wszystkich komplikacji) i statystyczne prawa, które rządzą światłem fotonów, decydują także o tym, w jaki sposób energia jest rozdzielana między nimi - o przydziale fotonów do różnych stanów energii.

Fotony mają wiele intrygujących właściwości. Jedną z nich stanowi fakt, że liczba fotonów nie jest stała. Produkuje nowe fotony za każdym razem, gdy włączamy lampę, a Słońce i inne gwiazdy są źródłami olbrzymiej liczby fotonów. Fotony są nieustannie absorbowane przez ściany pokoju, w którym siedzimy i czytamy tę książkę, przez nasze oczy, przez powierzchnię Ziemi i tak dalej. Te dwa procesy nie są jednak w równowadze i liczba fotonów we wszechświecie cały czas się zmienia.

Jest to zachowanie zdecydowanie różne od tego, jakie przejawiają obiekty, o których przywykliśmy myśleć jak o cząstkach, na przykład elektrony. Elektronu nie da się stworzyć ani unicestwić, z wyjątkiem szczególnych okoliczności, w których elektron oraz jego antycząstka - pozyton - są wspólnie tworzone (lub unicestwiane). Całkowita liczba elektronów we wszechświecie (przy czym pozyton jest liczony jako „minus jeden” elektron) się nie zmienia.

Okazuje się, że do elektronów i fotonów stosują się różne rodzaje statystyki. Dla elektronów obowiązuje rozkład znany fizykom jako statystyka Fermiego-Diraca, dla upamiętnienia prac włoskiego uczonego, Enrico Fermiego, oraz Anglika, Paula Diraca. Cząstki, które stosują się do reguł znanych obecnie jako statystyka Bosego-Einsteina, na przykład fotony, są zwane bozonami, a cząstki przestrzegające statystyki Fermiego-Diraca, na przykład elektrony, noszą nazwę fermionów.

Dlaczego statystyka Bosego-Einsteina nie nazywa się po prostu statystyką Bosego? W 1924 roku Bose wysłał rękopis z opisem swojego odkrycia do „Philosophical Magazine”, lecz nie otrzymał odpowiedzi. W czerwcu tego samego roku wysłał kopię tej pracy Einsteinowi z prośbą, aby przeczytał rękopis i jeśli uzna, że zasługuje on na opublikowanie, przekazał go wydawcom „Zeitschrift für Physik”. Praca zrobiła na Einsteinie takie wrażenie, że osobiście przetłumaczył ją na niemiecki (z angielskiego) i wysłał do „Zeitschrift” wraz z własną rekomendacją. Aprobata Einsteina była w owym czasie równoznaczna z akceptacją „Zeitschrift” i praca ukazała się w druku latem 1924 roku.

Skutki były niezwykle. Bose wyprowadził równanie dla promieniowania ciała doskonale czarnego, traktując fotony jak kwantowy gaz - jak realne cząstki, których zachowaniem rządzi pewien rodzaj statystyki. Na żadnym etapie w rachunkach Bosego nie ma nawet śladu fali elektromagnetycznej! Einstein podjął ten temat i posługując się koncepcją nowej statystyki, zastosował ją do innych problemów w trzech publikacjach, które okazały się jego ostatnim poważnym przyczynkiem do teorii kwantowej. Opisując zachowanie gazów w różnych warunkach (w pewnych sytuacjach statystyka Bosego-Einsteina stosuje się także do cząstek, których liczba jest zachowana), Einstein pokazał między innymi, że - podobnie jak zachowanie światła (tradycyjnie uważanego za falę) może być wyjaśnione w kategoriach cząstek - w niektórych sytuacjach także molekuly (cząstki) powinny zachowywać się jak fale⁵⁰.

Właśnie w okresie, gdy Einstein rozmyślał nad znaczeniem tego odkrycia, pod koniec 1924 roku, otrzymał kopię pracy doktorskiej Louisa de Broglie'a. Przesłał mu ją Paul Langevin (promotor de Broglie'a), który nie mógł się zdecydować, czy z pozoru absurdalny pomysł, że cząstki takie jak elektron mogłyby zachowywać się jak fale, stanowi przejaw geniuszu, czy raczej jest zupełnie niedorzeczny. „Sądzę - napisał Einstein - że jest to coś więcej niż zwykła analogia”. To wystarczyło, aby praca de Broglie'a została potraktowana poważnie.

Zawierzywszy autorytetowi Einsteina, Erwin Schrödinger rozwinął hipotezę de Broglie'a i stworzył całościowy opis kwantowego świata, mechanikę falową. Znacznie później Schrödinger stwierdził, że „mechanika falowa zrodziła się ze statystyki”, a w liście do Einsteina z 1926 roku napisał: „Cała ta sprawa nie zaczęłaby się ani teraz, ani w żadnym innym momencie (przynajmniej z mojego punktu widzenia), gdyby nie pański drugi artykuł o gazie Bosego, w którym zwrócił pan uwagę na istotne znaczenie jego koncepcji”⁵¹.

Sam Bose nie wziął udziału w ekscytującym procesie rozwijania teorii kwantowej w ciągu następnych kilku lat, lecz zajął się innym spośród swoich wczesnych zainteresowań - próbami rozszerzenia ogólnej teorii względności i poszukiwaniem, śladem Einsteina, zunifikowanej teorii pola, co okazało się przedsięwzięciem przedwczesnym. Po śmierci Einsteina w 1955 roku badania te straciły impet, a prace Bosego z tej dziedziny w zasadzie zostały zapomniane. Ostatnie dwadzieścia lat życia Bose poświęcił nauczaniu i popularyzacji nauki. „W gruncie rzeczy nie zajmowałem się już nauką - wspominał pod koniec życia. - Byłem jak kometa, która pojawiła się raz i nigdy więcej nie powróciła”. Ale olśniewające światło rzucone przez tę kometę zmieniło sposób myślenia fizyków w latach dwudziestych i znacząco wpłynęło na dalszy rozwój fizyki.

Od chwili, gdy foton otrzymał swą nazwę, do czasu, gdy fizycy w końcu zdołali stworzyć zadowalającą teorię skwantowanego pola elektromagnetycznego, upłynęło ponad dwadzieścia lat, lecz ich trud nie był daremny, gdyż teoria, która w końcu powstała, znana jako elektrodynamika

⁵⁰ W 1996 roku zrealizowano doświadczalnie koncepcję tak zwanej kondensacji gazu Bosego-Einsteina (przyp. tłum.).

⁵¹ Cytaty w tej i w następnej części pochodzą z artykułu Dipankara Home'a, „New Scientist”, 8 stycznia 1994.

kwantowa (QED⁵²), jest najbardziej skuteczną i dokładną teorią naukową, jaka kiedykolwiek powstała. Opisuje ona oddziaływanie elektronów z promieniowaniem elektromagnetycznym, wyjaśnia wszystkie zjawiska fizyczne z wyjątkiem grawitacji i właściwości jąder atomowych, a jej dokładność została zweryfikowana z niezwykłą precyzją w licznych eksperymentach.

Osobliwa teoria światła i materii

Powyższy tytuł pożytyłem z podtytułu wspaniałej książki Richarda Feynmana, *QED*. Feynman (1918-1988) był najwybitniejszym fizykiem swojego pokolenia - dokonał wielu ważnych odkryć, napisał niezwykle popularny podręcznik do fizyki, jego autobiograficzne książki cieszą się równie wielką popularnością, był doskonałym i szeroko znanym wykładowcą i nauczycielem fizyki, a pod koniec życia był jednym z najślawniejszych naukowców na Ziemi (także ze względu na swój barwny charakter). Jednak spośród jego licznych dokonań największym⁵³ osiągnięciem była z pewnością QED, zwana przez niego „osobliwą teorią światła i materii”.

QED jest tak istotna dlatego, że oddziaływania elektronów ze sobą i z promieniowaniem elektromagnetycznym decydują niemal o wszystkim, co się wokół nas dzieje. Świat wokół nas, a także my sami, składa się z atomów, które z kolei są zbudowane z umieszczonego w środku jądra i otaczających go elektronów. Elektrony są w istocie widoczną z zewnątrz „fasadą” atomu, a oddziaływania atomów i molekuł są w rzeczywistości oddziaływaniami ich chmur elektronowych. Elektrony oddziałują ze sobą, wymieniając fotony. Gdy elektron wysyła foton, doznaje pewnego rodzaju „odrzutu”, a gdy pochłania foton, doznaje „kopnięcia”. Wszystkie oddziaływania atomów można wytłumaczyć za pomocą tego „odrzutu” i „kopnięcia”.

Fizyka kwantowa, a w szczególności QED, stanowi podstawę całej chemii. Życie i wszystkie zjawiska biologiczne opierają się na zachowaniu skomplikowanych molekuł, takich jak białka i DNA, których właściwości są również domeną chemii i w rezultacie wynikają z kwantowych cech elektronów. Sposób, w jaki elektrony są utrzymywane w obszarze chmury wokół jądra atomowego, zależy od oddziaływania pomiędzy ujemnym ładunkiem elektronów i dodatnim ładunkiem protonów w jądrze, więc tym także rządzi QED. Rozpad radioaktywny oraz pokrewne mu zjawiska, związane ze zmianami wewnątrz samego jądra atomowego, nie mogą natomiast być opisane w ramach QED, lecz wymagają odrębnej teorii. Nasza obecna wiedza o tym, co się dzieje wewnątrz jądra atomowego, jest oparta na teoriach, które zostały celowo stworzone na wzór QED i które także okazały się skuteczne, aczkolwiek w mniejszym stopniu niż sama QED.

Istnieje wiele sposobów poglądowego przedstawienia QED, lecz dla mnie najbardziej atrakcyjny jest sposób, w jaki robi to Feynman, który formułuje opis w kategoriach cząstek - fotonów i

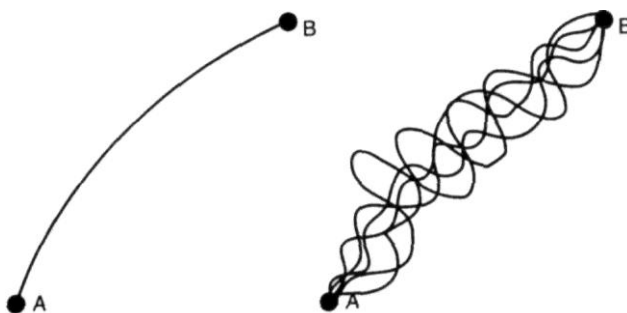
⁵² Od ang. *quantum electrodynamics* (przyp. tłum.).

⁵³ Przynajmniej w kategoriach naukowych. Gdy jeden z moich kolegów, Marcus Chown, był studentem Caltechu [California Institute of Technology - Kalifornijski Instytut Technologiczny - przyp. tłum.] poprosił Feynmana, aby wytłumaczył jego matce, dlaczego fizyka jest tak ważną nauką. Feynman napisał do matki Chowna list, w którym starał się przedstawić sprawę w odpowiedniej perspektywie i poradził jej, aby zupełnie nie przejmowała się tym, czym jej syn się zajmuje. „Liczy się miłość, a nie fizyka” - napisał w swoim liście Feynman.

elektronów - oraz fal prawdopodobieństwa. Fale prawdopodobieństwa mówią nam, gdzie jest największa szansa na znalezienie cząstek, lecz gdy już je znajdziemy (podobnie jest w elektronicznej wersji doświadczenia z dwiema szczelinami), to zawsze znajdujemy cząstki, a nie fale. Feynman stwierdza, że w oddziaływaniu materii i światła istotne są tylko trzy sprawy. Po pierwsze, prawdopodobieństwo, że foton pobiegnie z jednego miejsca do innego. Po drugie, prawdopodobieństwo, że elektron pobiegnie z jednego miejsca do innego. Po trzecie, prawdopodobieństwo, że elektron pochłonie lub wyemituje foton. Jeżeli potrafimy wyliczyć prawdopodobieństwa wszystkich tych zdarzeń dla wszystkich elektronów i fotonów, to możemy się dowiedzieć, jaki będzie rezultat oddziaływania elektronów i fotonów.

Dla skomplikowanych układów obliczenia te wymagają uwzględnienia olbrzymiej liczby pojedynczych wyrażeń (mimo że same w sobie są one względnie proste) i z tego powodu dokładne rachunki zostały przeprowadzone tylko dla kilku dosyć prostych sytuacji - związanych z wymianą niewielkiej liczby fotonów przez niewielką liczbę elektronów. Te proste przykłady są jednak bardzo przydatne w formułowaniu bardziej ogólnych przybliżeń, które mogą być dosyć dokładne i które można zastosować w bardziej skomplikowanych sytuacjach.

Część komplikacji związanych z tymi obliczeniami bierze się stąd, że wzmianka: „prawdopodobieństwo, że foton (lub elektron) pobiegnie z jednego miejsca do innego” kojarzy się niemal zawsze z cząstką poruszającą się z punktu A do punktu B wzdłuż określonej, gładkiej trajektorii. Jednak skojarzenie to jest błędne! Jedną z podstawowych właściwości QED jest odkrycie, dokonane przez Feynmana, że musimy uwzględnić każdą możliwą drogę od A do B. Widzieliśmy już, dzięki doświadczeniu z dwiema szczelinami, że pojedynczy foton biegnący przez układ doświadczalny, wydaje się świadomy istnienia obu szczelin, tak jak gdyby przebiegał przez obie drogi prowadzące od źródła do ekranu. Feynman idzie jeszcze dalej i mówi, że po drodze z jednego miejsca do innego cząstka bierze pod uwagę każdą możliwą drogę - nie tylko proste lub gładko zakrzywione trajektorie, lecz także nawet najbardziej skomplikowane i kręte ścieżki, jakie możemy sobie wyobrazić.

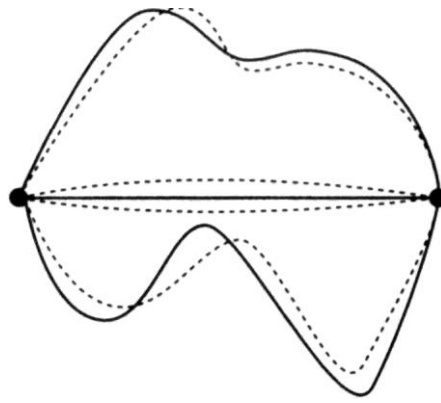


Ryc. 7. Klasyczna fizyka newtonowska mówi, że cząstka porusza się wzdłuż określonej trajektorii od punktu A do B. Mechanika kwantowa w wersji Richarda Feynmana mówi, że musimy obliczyć efekty wszystkich możliwych dróg od A do B i dodać je do siebie - nie tylko tych kilku dróg pokazanych tutaj, lecz dosłownie wszystkich możliwych. To podejście, nazwane „sumowaniem po historiach” lub „całkowaniem po trajektoriach”, jest jedną z metod zrozumienia, w jaki sposób pojedynczy elektron może przejść przez oba otwory równocześnie, a następnie interferować sam ze sobą

Wydaje się to absurdem, lecz sposób, w jaki Feynman doszedł do tej konkluzji, pokazuje, że jest ona (niemal!) oczywista. W doświadczeniu z dwiema szczelinami prawdopodobieństwo otrzymania jasnej plamki w określonym miejscu na ekranie musi zostać wyliczone z uwzględnieniem możliwości, że światło przechodzi przez obie szczeliny. To brzmi całkiem rozsądnie, pod warunkiem że zapomnimy na chwilę o korpuskularnej naturze światła. Co zatem się stanie, jeżeli zamiast dwu szczelin w przesłonie zrobimy cztery? Będziemy musieli uwzględnić w obliczeniach cztery fale prawdopodobieństwa. Przy ośmiu szczelinach będzie osiem fal prawdopodobieństwa i tak dalej. Nawet gdy w przegrodzie zostanie wyciętych milion szczelin, to i tak będziemy mogli - przynajmniej w zasadzie - obliczyć położenia jasnych prążków na ekranie, dodając (całkując) fale prawdopodobieństwa odpowiadające milionowi różnych dróg, którymi światło może podążać w stronę ekranu. Jeżeli będziemy kontynuować ten proces i dzielić przegrodę na coraz większą liczbę szczelin, to w pewnym momencie okaże się, że w przegrodzie jest więcej szczelin niż przesłona, aż wreszcie dojdziemy do punktu, gdy przegroda będzie składać się z samych szczelin, nakładających się na siebie nawzajem - przesłona znikną. Feynman zdał sobie sprawę, że gdy przeszkoda zniknie, to musimy dodać fale prawdopodobieństwa odpowiadające wszystkim możliwym trajektoriom od źródła do ekranu. W istocie, gdy na drodze od źródła do ekranu nie ma przeszkód, to musimy uwzględnić dosłownie każdą ścieżkę. Prawdopodobieństwa związane z bardziej skomplikowanymi trajektoriami są bardzo małe i zazwyczaj nawzajem się kasują⁵⁴ w rachunkach, ale mimo to zawsze występują, co Feynman zilustrował, opisując, jak światło odbija się od lustra.

Jedną z rzeczy, o których uczymy się w szkole, jest zasada, zgodnie z którą światło odbija się od lustra w taki sposób, że kąt padania równa się kątowi odbicia. Łatwo się o tym przekonać, patrząc na powierzchnię lustra pod pewnym kątem i obserwując, które przedmioty znajdują się na linii wzroku. Zasada powyższa wiąże się z prawem, które mówi, że światło porusza się zawsze wzdłuż takiej drogi, aby czas potrzebny na dotarcie od punktu A do punktu B był jak najkrótszy. Jeżeli światło po drodze od źródła do naszego oka odbija się od lustra, to powyższa zasada równości kątów padania i odbicia rzeczywiście wyznacza najkrótszą drogę, po której światło może przedostać się do oka, a zatem czas potrzebny na przebycie tej drogi jest najkrótszy z możliwych. Gdyby ktoś nam powiedział, że światło, po drodze do naszego oka, trafia do każdego punktu lustra, a odbicia od wszystkich tych punktów, pod różnymi niewiarygodnymi kątami, łączą się następnie ze sobą i tworzą obraz, który widzi nasze oko, to zapewne bylibyśmy zaszokowani. Przygotujmy się zatem na szok, gdyż dokładnie tak się to odbywa zgodnie z prawami fizyki kwantowej.

⁵⁴ Autor nieco upraszcza kwestię sumowania. Prawdopodobieństwa są dodatnimi liczbami rzeczywistymi, więc nie mogą się kasować. „Kasują” się amplitudy fal prawdopodobieństwa (według interpretacji kopenhaskiej) lub całki po trajektoriach (według Feynmana). Cały problem sprowadza się do poglądowego wytłumaczenia interferencji światła w języku elektrodynamiki kwantowej (przyp. tłum.).



Ryc. 8. Podejście Feynmana do mechaniki kwantowej stosuje się także do światła. W rzeczywistości światło nie porusza się wzdłuż linii prostych, lecz wzdłuż każdej możliwej drogi od źródła do obserwatora. Tylko tak się składa, że gdy dodaje się „historie”, to kasują się wszystkie oprócz tych, które są zbliżone do linii prostej

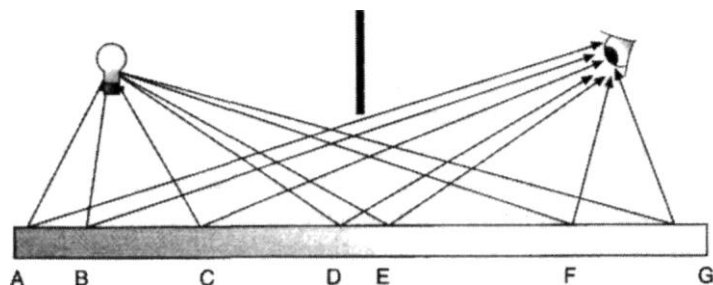
Wyobraźmy sobie światło biegnące od źródła prosto do lustra (prostopadle do powierzchni lustra), a następnie odbijające się pod odpowiednio ostrym kątem, tak aby trafić do oka. Inna możliwość polegałaby na tym, że światło pobiegłoby od źródła do tego punktu lustra, który znajduje się dokładnie na wprost nas, aby następnie odbić się od tego punktu pod kątem prostym (do powierzchni lustra) i trafić do oka. Możemy sobie nawet wyobrazić, że światło pobiegłoby w przeciwną stronę, o d d a l a j ą c się od nas, aby następnie odbić się pod bardzo ostrym kątem i również trafić do oka. Wszystkie te, a także wszystkie inne możliwości rzeczywiście zachodzą.



Ryc. 9. Fizyka klasyczna mówi, że lustro odbija światło w taki sposób, że kąt odbicia jest zawsze równy kątowi padania

Nie widzimy tego, gdyż trajektorie najbliższe najkrótszej drodze są nie tylko bardziej prawdopodobne, lecz nawzajem się wzmacniają, co w rezultacie powoduje, że najkrótsza droga jest zdecydowanie najbardziej prawdopodobna. Jak mówi Feynman, „najkrótszy czas jest tam, gdzie czasy przejścia zbliżonymi ścieżkami są niemal takie same”⁵⁵, dzięki czemu prawdopodobieństwa odpowiadające tym ścieżkom dodają się konstruktywnie.

⁵⁵ R. Feynman, *QED*, s. 49.

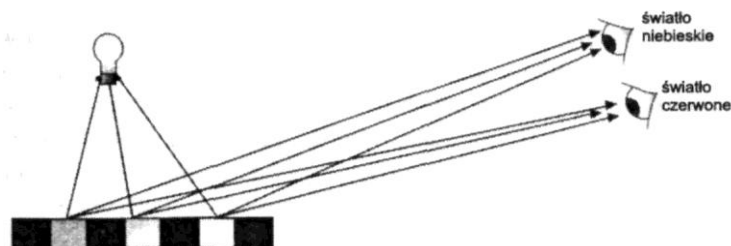


Ryc. 10. Feynman odkrył, że wszystkie drogi są istotne, mimo że sumowanie po historiach faworyzuje linie proste. Światło odbija się od wszystkich obszarów lustra pod różnymi kątami. Drogi związane z odbiciami od sąsiadujących obszarów kasują się nawzajem, z wyjątkiem sąsiedztwa klasycznej trajektorii

Na krańcach lustra, gdzie fotony odbijają się pod różnymi dzikimi kątami, aby dostać się do naszych oczu, różnica czasów dla „sąsiednich” ścieżek jest znacznie większa. Okazuje się, że prawdopodobieństwa odpowiadające sąsiadującym ścieżkom niemal zupełnie kasują się nawzajem, gdy tylko ta różnica czasów staje się znacząca. Tak więc tylko ta część lustra odgrywa istotną rolę, o której instynktownie sądzimy, że światło właśnie od niej się odbija.

Istnieje prosty sposób, aby się przekonać, że odbite fotony rzeczywiście biegną do naszego oka z każdego punktu lustra, nawet - mimo że niemal całkowicie się kasują - z najbardziej odległych krańców. Wyobraźmy sobie, że zasłoniliśmy lustro kawałkiem czarnego materiału, zostawiając odkryty tylko niewielki fragment na samym skraju. Materiał pochłania światło, więc nie warto szukać obrazu w tym miejscu, w którym fotony biegnące od źródła odbijałyby się w kierunku naszego oka pod kątem równym kątowi padania. Musimy dokonać pewnej sztuczki, żeby zobaczyć obraz dzięki promieniom odbitym od kawałka lustra pod „złym” kątem.

Wprawdzie prawdopodobieństwa odpowiadające sąsiadującym obszarom na skraju lustra nawzajem się kasują, lecz istnieją obszary, dla których dodają się one konstruktywnie. Problem polega na tym, że konstruktywnie współdziałające pasma na powierzchni lustra są oddzielone od siebie pasmami działającymi destruktywnie. Jeżeli uwzględnimy cały odsłonięty obszar lustra, to układy od wszystkich tych pasm nawzajem się skasują, lecz istnieją wśród nich grupy pasm dających konstruktywne efekty cząstkowe. Żeby się o tym przekonać, wystarczy przykryć odsłonięty obszar lustra odpowiednio dobranymi pasemkami materiału tak, aby zasłonić destruktywnie działające fragmenty lustra. Powierzchnia odbijająca zmniejszy się przez to o połowę, lecz pozostałe fragmenty dadzą konstruktywny efekt końcowy.



Ryc 11. Można naprawdę zobaczyć światło odbijające się pod różnymi kątami, jeżeli w odpowiedni sposób zasłoni się równoległe pasy na powierzchni lustra tak, aby „kasujące” drogi zostały wykluczone. Zasłaniając połowę lustra, można uzyskać więcej odbitego światła! Różne kolory światła odbijają się od takiej siatki dyfrakcyjnej pod

różnymi kątami, dając efekt tęczy. Sztuczka uda się tylko wtedy, gdy zasłonięte i odbijające pasy są bardzo wąskie, lecz wystarczy popatrzeć pod światło na płytę kompaktową, żeby zobaczyć ten efekt

Odstęp między pasmami, które współdziałają konstruktywnie, zależy od długości fali światła, które odbija się od lustra (piękny przykład dualizmu falowo-korpuskularnego, gdy opisujemy promień światła za pomocą fotonów!), więc najlepszy obraz uzyskamy, eksperymentując ze światłem jednego koloru (monochromatycznym). Ustawiamy kawałek lustra w złym miejscu i oczywiście nie widzimy odbicia. Następnie przykrywamy połowę lustra w odpowiedni sposób (choć zdrowy rozsądek mówi nam, że mamy jeszcze mniejszą szansę na zobaczenie czegokolwiek) i uzyskujemy odbicie.

Taki układ odbijających pasm nosi nazwę siatki dyfrakcyjnej (ponieważ zjawisko odbicia światła można także wytłumaczyć w kategoriach dyfrakcji fal świetlnych) i prawdopodobnie większość czytelników wiele razy widziała to zjawisko. Siatka równoległych równo oddalonych odbijających pasm odbija różne kolory pod nieco różnymi kątami, rozszczepiając białe światło na takie samo tęchowe widmo, jakie Newton zobaczył, rozszczepiając światło słoneczne za pomocą pryzmatu. Taki sam efekt można uzyskać, trzymając pod światło płytę kompaktową. Jeżeli ustawimy płytę pod prawidłowym kątem (zgodnie ze zdroworozsądkowym prawem odbicia), to na jej lśniącej powierzchni zobaczymy zwykle odbicie żarówki. Lecz wystarczy ją nieco przekręcić, aby zdroworozsądkowe odbicie żarówki zniknęło z pola widzenia, a na jego miejscu pojawią się tęchowe refleksy, produkowane przez fotony odbijające się pod dzikimi kątami od koncentrycznych rowków na lustrzanej powierzchni płyty. W gruncie rzeczy zazwyczaj można zobaczyć kolorowe pasma odbite od „złej” części płyty nawet wtedy, gdy widzimy także „normalny” obraz. Możemy się przekonać na własne oczy, jak działa QED, nie opuszczając zacisza własnego domu.

Dotychczas mówiliśmy tylko o sytuacjach, w których światło porusza się wzdłuż linii prostych i odbija się od lustra pod różnymi kątami. W rzeczywistości teoria uwzględnia wszystkie możliwe trajektorie, wzdłuż których światło może się przemieszczać, nawet najdziwniej powykrzywiane. Ponieważ w obliczeniach uwzględnia się (całkuje) wszystkie ścieżki, podejście to nosi nazwę „całki po trajektoriach” (ang. *path-integral*) lub „sumy po ścieżkach” (ang. *sum-over-histories*⁵⁶)- Tak się składa, że prawdopodobieństwa dodają się zawsze w taki sposób, że światło stwarza wrażenie, jakby poruszało się wzdłuż linii prostej, gdyż poza „klasyczną” prostą trajektorią prawdopodobieństwa kasują się nawzajem całkowicie. „Światło w rzeczywistości nie biegnie tylko po prostych - mówi Feynman - «bada» także sąsiednie drogi i wykorzystuje niewielki obszar sąsiadującej z prostą przestrzeni”⁵⁷.

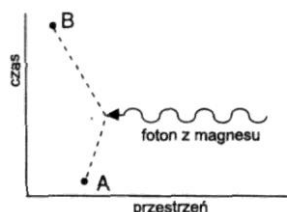
W ten sam sposób, sumując przyczynki od różnych trajektorii, teoria wyjaśnia inne zjawiska optyczne, łącznie z działaniem soczewek, ugięciem i zmianą prędkości światła przy przejściu z powietrza do wody, doświadczeniem z dwiema szczelinami i plamką Poissona. Prawdziwy triumf QED polega jednak na tym, jak dokładnie potrafi ona opisać oddziaływanie fotonów i elektronów.

⁵⁶ Dostłownie: „suma po historiach”; „historie” są tu rozumiane jako pojedyncze trajektorie cząstki (przyp. tłum.).

Triumf QED

Najprostszy przypadek oddziaływania fotonów i elektronów zachodzi wtedy, gdy elektron poruszający się z jednego miejsca do drugiego emituje lub absorbuje foton i w rezultacie trafia gdzie indziej. Foton mógł zostać wyemitowany lub zaabsorbowany przez inny elektron, w innym miejscu. Może też być fotonem związanym z polem magnetycznym, którego źródło stanowi zwykły magnes. Już w 1929 roku Paul Dirac, jeden z pionierów teorii kwantowej, stworzył opis oddziaływania fotonów i elektronów całkowicie zgodny ze szczególną teorią względności, lecz nie w pełni uwzględniający wymagania teorii kwantowej. Opierając się na stworzonym przez siebie modelu oddziaływania elektronu i fotonu, Dirac obliczył pewną wielkość, będącą miarą oddziaływania elektronu z polem magnetycznym (odpowiednia właściwość elektronu nazywa się momentem magnetycznym). Dirac wyliczył, że wielkość ta wynosi 1, w pewnych umownych jednostkach, lecz okazało się, że eksperymentalna wartość jest równa około 1,00116.

Różnica jest niewielka, lecz dostatecznie duża, aby wykazać, że teoria jest niepełna. Julian Schwinger z Harvard University (który urodził się w 1918 roku w Nowym Jorku, w tym samym roku i w tym samym mieście co Feynman) odkrył w 1948 roku sposób na udoskonalenie obliczeń Diraca, gdy zdał sobie sprawę, że nic nie stoi na przeszkodzie, aby elektron w drodze z jednego miejsca do innego wyemitował foton, a następnie pochłoniął go z powrotem. Taki proces komplikuje nieco obliczenie prawdopodobieństwa, więc w efekcie moment magnetyczny elektronu okazał się nieco większy. Nadal nie zgadzał się z wynikiem doświadczalnym, lecz zmierzał w dobrym kierunku.

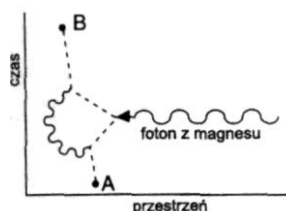


Ryc. 12. Pierwsze obliczenia momentu magnetycznego elektronu, wykonane przez Paula Diraca, oparte są na prostym oddziaływaniu z jednym fotonem

Gdy fizycy zorientowali się, co się dzieje, następne etapy obliczeń niezbędnych do poprawienia wartości momentu magnetycznego elektronu stały się oczywiste (aczkolwiek bardzo uciążliwe). Po pierwsze, trzeba uwzględnić możliwość, że oddziałujący z jednym z fotonów pola magnetycznego elektron wyemituje dwa własne fotony, jeden po drugim, a następnie ponownie je pochłonie. Należy wziąć pod uwagę każdy możliwy sposób, w jaki może się to wydarzyć, i dodać wszystkie prawdopodobieństwa. Już na tym etapie sytuacja stała się na tyle skomplikowana, że upłynęły dwa lata, zanim obliczenia zostały wykonane, ale rezultat jeszcze bardziej poprawił zgodność między teorią a doświadczeniem.

⁵⁷ R. Feynman, *QED*, s. 58.

Obliczenia uwzględniające trzy „nadliczbowe” fotony zostały ukończone w połowie lat osiemdziesiątych. Kolejne etapy rachunkowe w coraz mniejszym stopniu wpływają na końcowy wynik (aczkolwiek są *z n a c z n i e* trudniejsze). Obecnie teoretyczna wartość momentu magnetycznego elektronu wynosi 1,00115965246, z dokładnością do około 20 na dwóch ostatnich miejscach po przecinku. W ciągu dziesięcioleci, które upłynęły od pierwszego eksperymentu, eksperymentatorzy również poprawili dokładność pomiarów; obecna wartość to 1,00115965221, z dokładnością do około 4 na ostatnim miejscu po przecinku. Precyzja tych doświadczeń jest mniej więcej taka, jak pomiar odległości z Los Angeles do Nowego Jorku - ponad 3000 mil (około 5000 km), z dokładnością równą grubości ludzkiego włosa. Zgodność między tymi dwiema liczbami pokazuje, że - w sensie zgodności teoretycznych przewidywań z wynikami eksperymentalnych testów - QED jest najlepszą teorią, z jaką kiedykolwiek mieliśmy do czynienia. Może się nam ona wydawać niezwykła, możemy jej nie lubić, lecz nie możemy zaprzeczyć, że działa - że świat rzeczywiście funkcjonuje zgodnie z jej przewidywaniami. Cytując Feynmana, „niemal cała olbrzymia różnorodność zjawisk w Naturze wynika z monotonnego składania zaledwie trzech podstawowych ruchów”: przejścia fotonu z jednego miejsca do drugiego, przejścia elektronu z jednego miejsca do drugiego i oddziaływania elektronu z fotonem⁵⁸.



Ryc. 13. Dokładniejsze obliczenia momentu magnetycznego elektronu uwzględniają możliwość, że elektron emituje foton i reabsorbuje go. Sukcesywne poprawki w tych obliczeniach dodają kolejne fotony do pętli

Mimo że teoria wykazuje tak doskonałą zgodność z eksperymentem, pewne jej cechy są bardzo osobliwe - jeszcze dziwniejsze od tych, o których mówiliśmy do tej pory. Gdy dwa elektrony oddziałują ze sobą przez wymianę fotonu, to ze zdroworozsądkowego punktu widzenia mogłoby się wydawać, że jeden z nich emituje foton, a w chwilę później (lub dużo później) drugi elektron go absorbuje. Mamy jednak pełne prawo powiedzieć, że to drugi elektron emituje foton „w przyszłości”, foton podróżuje wstecz w czasie i zostaje zaabsorbowany przez pierwszy elektron „w przeszłości”. Pomysł ten nie jest aż tak trudny do zaakceptowania, zwłaszcza że wiemy już o tym, iż czas nie ma znaczenia dla fotonu. Ta sama zasada dotyczy jednak także elektronów!

Jeżeli foton ma dostatecznie dużą energię, to może zamienić się w parę elektronopodobnych cząstek (żeby to było możliwe, energia E fotonu musi być większa niż $2mc^2$ - energia obu elektronów). Jedną z tych cząstek jest zwykłym elektronem, natomiast druga różni się od elektronu tylko pod jednym względem - jest obdarzona ładunkiem o przeciwnym (dodatnim) znaku niż elektron i nazywa się pozyton. Jak zawsze, równania opisujące ten proces są

⁵⁸ R. Feynman, *QED*, s. 114.

symetryczne. Gdy elektron i pozyton spotykają się ze sobą, anihilują się nawzajem i produkują w wyniku foton o wysokiej energii. W typowym scenariuszu, obserwowanym wielokrotnie w eksperymentach, foton zamienia się w parę elektron-pozyton, które następnie rozbiegają się w przeciwnych kierunkach. Pozyton bardzo szybko napotyka inny elektron, z którym anihiluje, dając w rezultacie inny foton.

Feynman zauważył, że całe to oddziaływanie można opisać za pomocą tylko jednego elektronu, który - po drodze z jednego miejsca do drugiego - oddziałuje z fotonem. Oddziaływanie to posyła elektron wstecz w czasie, aż napotyka on inny foton, zostaje „zawrócony” i ponownie porusza się w przód w czasie. Wydaje się, że w każdym z tych oddziaływań biorą udział trzy obiekty - pozyton, elektron i foton. Na podobnej zasadzie, gdy światło odbija się od lustra, wydaje się nam, że mamy do czynienia z trzema obiektami - dwoma promieniami światła, spotykającymi się w jednym punkcie na powierzchni lustra, oraz z samym lustrem. W rzeczywistości jest to jeden promień odbity pod takim samym kątem, pod którym padł na powierzchnię lustra, oraz samo lustro. Na podobnej zasadzie możemy wyobrazić sobie jeden elektron odbijający się wstecz w czasie i foton grający rolę „czasowego lustra” dla elektronu.

W chwili, gdy elektron porusza się wstecz w czasie, z naszego punktu widzenia wygląda on jak pozyton (przenosząc ujemny ładunek elektryczny wstecz w czasie elektron - zgodnie z klasyczną zasadą podwójnej negacji - efektywnie przenosi dodatni ładunek w przód w czasie). W miarę wzrostu dokładności obliczenia momentu magnetycznego elektronu stają się coraz bardziej skomplikowane i trzeba uwzględniać takie efekty i oddziaływania nawet pomiędzy „nadliczbowymi” fotonami produkowanymi przez elektron.

To jest niemal wszystko, co miałem zamiar powiedzieć o QED. Chciałbym raz jeszcze podkreślić, że wszystkie opisane powyżej zjawiska - jakkolwiek dziwne i niezrozumiałe - leżą u podstaw najlepszej teorii fizycznej, jaką kiedykolwiek mieliśmy, teorii, która t r z e m osobom przyniosła Nagrodę Nobla w 1965 roku (Feynmanowi, Schwingerowi i japońskiemu uczonemu, Sinitiro Tomonadze) i która jest perłą w koronie współczesnej nauki. Nie możemy się pozbyć takich dziwactw jak fotony, a nawet elektrony podróżujące wstecz w czasie, nie odrzucając QED w całości.

W tym miejscu muszę uczynić jedno wyznanie. QED jest n i e m a l doskonałą teorią, lecz z matematycznego punktu widzenia ma jedną poważną wadę. Problem dotyczy tego, co się dzieje, gdy elektron jest pozostawiony samemu sobie. Nawet gdy jest on całkowicie samotny, nadal emituje i absorbuje fotony. Fotony te mogą rozpaść się na pary elektronowo-pozytonowe anihilujące z powrotem w fotony. Pary elektronów i pozytonów mogą jednak także (zanim same anihilują) emitować i absorbować kolejne fotony. Zgodnie z QED każdemu elektronowi towarzyszy wiele coraz bardziej skomplikowanych oddziaływań tego rodzaju. Problem polega na tym, że w wyniku tych wszystkich samooddziaływań w rachunkach pojawiają się nieskończone sumy odpowiadających im prawdopodobieństw i obliczenia takich prostych właściwości elektronu jak ładunek lub masa stają się rozbieżne - dają nieskończone wyniki, co jest oczywistym nonsensem.

Feynman, Schwinger i Tomonaga znaleźli sposób na usunięcie tych rozbieżności za pomocą pewnego chwytu, zwanego renormalizacją. Polega ona na wykonaniu operacji - o której z całą pewnością każdy z nas wie ze szkoły, że jest niedozwolona - podzielenia obu stron równania przez nieskończoność, a działa tylko dlatego, że znamy eksperymentalne wartości tych właściwości elektronu, które chcemy obliczyć. Fizycy akceptują renormalizację, gdyż nie mają innego wyboru - pozwala ona uzyskać poprawne wyniki, czego nie udało się osiągnąć za pomocą żadnej innej teorii, nawet tak naciąganej, jak renormalizacją. Trzej odkrywcy otrzymali Nagrodę Nobla za pokazanie światu, jak to się robi, ale na kilka lat przed śmiercią Feynman powiedział: „Przez to, że musieliśmy uciec się do takiego hokus-pokus, nie możemy udowodnić matematycznej spójności elektrodynamiki kwantowej [...] [renormalizacja] jest czymś, co nazwałbym zwariowaną procedurą!”⁵⁹

QED w obecnej postaci niemal na pewno nie stanowi ostatniego słowa, zostawiając pole do popisu dla następnego pokolenia fizyków teoretycznych. Jakakolwiek nowa wersja QED będzie jednak musiała obejmować także wszystkie te zjawiska, które obecna QED tłumaczy tak doskonale, więc nie uwolnimy się od całkowania po trajektoriach, od cząstek, które „czują” okolicę, gdy poruszają się w przestrzeni, od cząstek, które w całkowitej zgodzie z prawami fizyki poruszają się wstecz w czasie. Ta ostatnia właściwość wiąże się z innym, znacznie mniej spopularyzowanym odkryciem Feynmana, które może okazać się kluczem do tajemnic kwantowego świata.

Światło przyszłości

Było to pierwsze z wielu oryginalnych odkryć Feynmana, którego dokonał on w 1940 roku w Princeton, gdy był doktorantem Johna Wheelera. Nieskończoności, które nękały teorię kwantową, były już w owych czasach dobrze znane - a renormalizacją posłużono się dopiero osiem lat później - i Feynman zastanawiał się, czy nie dałoby się ich usunąć zabraniając elektronowi oddziaływanie z samym sobą. Okazało się, że, niestety, nie jest to możliwe.

Gdy elektrony są przyspieszane (popychane), to stawiają opór, a opór ten jest większy w przypadku elektronu niż w przypadku neutralnej cząstki. Gdy przez przewodnik płynie prąd, to elektrony promieniują energię (w formie fal radiowych), jeżeli są przyspieszane, lecz energia wydzielana przez nie w postaci promieniowania jest mniejsza od energii niezbędnej do popychania ich wzdłuż przewodnika. Ta forma oporu - nazywana oporem radiacyjnym, ponieważ wiąże się z przyspieszeniami, które są źródłem promieniowania - stanowi dodatkowy czynnik, oprócz normalnego oporu elektrycznego, jaki napotyka prąd płynący przez przewodnik. Opór radiacyjny pojawia się dlatego, że elektron z czymś oddziałuje, a ponieważ wydawało się, że nie może oddziaływać z pustą przestrzenią, w latach trzydziestych zjawisko to tłumaczono w kategoriach oddziaływania elektronu z samym sobą, mniej więcej tak, jak to przedstawiłem powyżej.

Feynman wpadł na doskonały pomysł. Nikt nigdy nie widział całkowicie wyizolowanego elektronu, ponieważ we wszechświecie istnieje olbrzymia liczba rozmaitych cząstek (w końcu sam

⁵⁹ R. Feynman, *QED*, s. 132.

fakt, że ktoś widzi wyizolowany elektron, oznacza, że nie jest on naprawdę wyizolowany). Feynman wyobraził sobie całkowicie pusty wszechświat, zamieszkały przez jeden jedyny elektron, i zastanawiał się, czy taki elektron mógłby w ogóle promieniować energię elektromagnetyczną. Być może, zasugerował Wheelerowi, muszą istnieć przynajmniej dwa elektrony, jeden do emisji, drugi do absorpcji, żeby samo promieniowanie mogło w ogóle zaistnieć. We wszechświecie zawierającym tylko dwa elektrony jeden z nich oscylowałby i wysyłał fotony, a drugi absorbowałby je i w rezultacie również oscylował, generując więcej fotonów i wysyłając je z powrotem w kierunku pierwszego elektronu. To powracające promieniowanie, oddziałując z pierwszym elektronem i przeciwstawiając się jego oscylacjom, byłoby źródłem oporu i tym samym formą oddziaływania między dwoma elektronami.

W tej prostej postaci powyższy schemat nie może poprawnie funkcjonować, ponieważ istnieje opóźnienie czasowe - fotony musiałyby przebyć dystans między jednym elektronem a drugim i z powrotem, zanim pierwszy elektron „zauważyłby” jakikolwiek opór. Wiemy jednak, że gdy fotony podróżują, to kierunek upływu czasu nie ma znaczenia. Wybiegając nieco w przyszłość, możemy powiedzieć, że - zgodnie z QED, która w 1940 roku nie została jeszcze odkryta - nie ma rozróżnienia między wstecz i w przód w czasie, przynajmniej w odniesieniu do fotonów. Jest to logiczne, ponieważ QED jest teorią w pełni relatywistyczną, a szczególna teoria względności mówi, że dla fotonu czas nie istnieje. Jeżeli czas potrzebny na wymianę fotonu jest równy zero, to na „zegarze” fotonu nie ma znaczenia, czy jest to +0 czy -0. Sukces obu tych teorii potwierdza, że sama natura nie potrafi odróżnić fotonu poruszającego się wstecz w czasie (z naszego punktu widzenia) od fotonu poruszającego się w przód w czasie. Natura „wie” jedynie, że została dokonana wymiana fotonu.

W 1940 roku nie istniała jeszcze QED, lecz Wheeler i Feynman wiedzieli, że równania Maxwella są całkowicie symetryczne względem czasu. Gdy rozwiąże się równanie opisujące ruch fali, zawsze otrzymuje się dwa rozwiązania, z których jedno odpowiada fali poruszającej się w przód w czasie, a drugie - fali poruszającej się wstecz w czasie. Jeżeli się nad tym dobrze zastanowić, to wydaje się to rozsądne, zważywszy, że z punktu widzenia samego światła czas nie płynie w żadnym kierunku. Jednak dopóki Feynman nie wpadł na ten nowy pomysł z elektronami promieniującymi energię, wszyscy po prostu pomijali drugie rozwiązanie równań Maxwella, gdyż przecież było „oczywiste”, że w rzeczywistości nie ma fal poruszających się wstecz w czasie.

Okazało się, że właśnie tego potrzeba, aby uratować pomysł Feynmana. Aby ułatwić sobie dalszą dyskusję, do końca tego rozdziału pozostaniemy przy opisie falowym. Fale rozchodzące się wokół elektronu lub wokół anteny radiowej noszą nazwę fal „opóźnionych”, ponieważ docierają one do celu później, niż zostały wyemitowane. Fale poruszające się wstecz w czasie noszą nazwę fal „przedwczesnych”, ponieważ docierają one do celu w c z e ś n i e j, niż zostały wyemitowane. Fale opóźnione można sobie wyobrazić jako rozchodzącą się we wszystkich kierunkach wokół anteny falę radiową albo jako zmarszczki na wodzie rozchodzące się wokół miejsca, w które uderzył wrzucony do jeziora kamień. Z naszej ludzkiej perspektywy fala przedwczesna

wyglądałaby jak biegnąca ze wszystkich stron w kierunku anteny fala radiowa albo jak zmarszczki na wodzie wyruszające ze wszystkich brzegów i zbiegające się w jednym punkcie na środku jeziora. W tym miejscu analogia się załamuje, ponieważ nie ma ujścia dla energii fali przedwczesnej skoncentrowanej na środku jeziora, lecz okazuje się, że opór radiacyjny można wytłumaczyć dzięki falom przedwczesnym nadchodzącym ze wszystkich stron wszechświata w kierunku elektronu. Pochłonięta przez elektron energia fal przedwczesnych przeciwstawia się ruchowi elektronu. Skąd jednak fale wiedzą, gdzie szukać elektronu? Informacji tej dostarczył im sam elektron.

Według poprawionej wersji teorii, zwanej obecnie teorią absorbera Wheelera-Feynmana (promotorzy mają sposoby, aby umieścić swoje nazwisko na pierwszym miejscu), gdy elektron drga, to wysyła zarówno opóźnioną falę w przyszłość, jak i przedwczesną falę w przeszłość. Gdy fala ta napotka inny elektron (ściśle rzecz biorąc - gdy napotka jakąkolwiek inną cząstkę obdarzoną ładunkiem elektrycznym) w jakimkolwiek miejscu wszechświata (w przestrzeni i w czasie), wprawia go w drgania, które z kolei powodują, że drugi elektron także wysyła fale zarówno w przyszłość, jak i w przeszłość. Tak więc, w wyniku drgań pojedynczego elektronu cały wszechświat wypełnia morze oddziałujących fal elektromagnetycznych. Większość z nich nawzajem się kasuje, podobnie jak kasują się amplitudy prawdopodobieństwa w kwantowym opisie odbicia światła od lustra. Niektóre z tych fal, zarówno opóźnione, jak i przedwczesne, powracają jednak do pierwszego elektronu, a ich energia jest źródłem oporu niezbędnego do wytłumaczenia obserwowanego zachowania przyspieszanych elektronów.

Na początku 1941 roku Wheeler zaproponował, aby Feynman przedstawił swoją teorię na seminarium wydziału fizyki w Princeton. Miało to być pierwsze wystąpienie Feynmana w tej roli, a na dodatek do grona słuchaczy (na seminarium przyszli wprawdzie wyłącznie miejscowi fizycy, ale trzeba pamiętać, że działo się to w Princeton w 1941 roku) zaliczali się Albert Einstein, Wolfgang Pauli (jeden z pionierów teorii kwantowej, który w wieku 19 lat, jeszcze jako student, napisał monografię szczególnej oraz ogólnej teorii względności uważaną za wzór jasności) oraz kilku innych mniej sławnych, lecz równie wybitnych uczonych. Po wysłuchaniu Feynmana Pauli, niezbyt przekonany, zauważył, że jest to raczej pewnego rodzaju matematyczna tautologia, i zapytał Einsteina, czy zgadza się z jego opinią. Einstein się nie zgadzał, stwierdził, że teoria robi wrażenie prawdopodobnej, „że ta teoria wydaje się sprzeczna z teorią grawitacji, która jednak nie jest dobrze potwierdzona doświadczalnie.”⁶⁰.

Byłoby przesadą twierdzić, że Feynman dostał skrzydeł, lecz nie sposób wyobrazić sobie bardziej przekonującego dowodu uznania dla studenta za jego pierwszą pracę naukową. Ale co właściwie zrobiło takie wrażenie na Einsteinie?

Po tym, co wiemy już o całkowaniu po trajektoriach, nie powinno być niespodzianką odkrycie, że gdy przeprowadzi się do końca obliczenia, większość fal tworzących wokół elektronu

⁶⁰ Cytowane za: J. Gleick, *Geniusz*, s. 121.

skomplikowaną sieć oddziaływań elektromagnetycznych kasuje się wzajemnie, zostawiając jedynie zwykłą „reakcję” wszechświata na ruch elektronu. Żadna z przedwczesnych fal nie zachowuje się w formie, która byłaby wykrywalna w jakikolwiek inny sposób, i wszystko, co „widzimy”, to zwykłe fale opóźnione.

Prawdziwe piękno tej teorii polega na tym, że z punktu widzenia elektronu „reakcja” jest natychmiastowa. Częściowo wynika ona z ruchu fal poruszających się w przyszłość i generujących fale podróżujące wstecz w czasie, które we właściwym momencie przybywają na miejsce, częściowo zaś z ruchu fal, które zostały wysłane w przeszłość i wygenerowały fale powracające w przyszłość. Tak czy inaczej, z punktu widzenia zegara umieszczonego obok elektronu (a właściwie z punktu widzenia każdego zegara) czas potrzebny na podróż w przeszłość jest taki sam jak czas potrzebny na powrót w przyszłość, więc odległość przebyta przez fale nie ma znaczenia. Reakcja pojawia się natychmiast, gdy elektron zostanie przyspieszony. Teoria Wheelera-Feynmana potrafi wytłumaczyć opór radiacyjny, nie potrafi natomiast usunąć nieskończoności z teorii kwantowej, co było pierwotnym zamierzeniem Feynmana. W nauce często się zdarza, że próba rozwiązania jakiegoś problemu pomaga znaleźć odpowiedzi na inne pytania (lub ujawnia istnienie innych problemów).

Jest jeszcze jeden aspekt tej historii, który pół wieku temu wydawał się problemem nie do pokonania. Teoria działa poprawnie tylko wtedy, gdy cała energia elektromagnetyczna wypromieniowana przez elektron zostanie „odbita wstecz w czasie” w opisany powyżej sposób. Jeżeli jakakolwiek część promieniowania ucieknie w pustą przestrzeń i nigdy nie napotka innej naładowanej cząstki, to nie da się zbilansować równań. W owym czasie wszechświat był uważany za nieskończony i „otwarty”. Próba odbicia wstecz w czasie całej energii wypromieniowanej przez elektron przypomina łapanie fal do pudła pozbawionego pokrywki. Teoria Wheelera-Feynmana daje prawidłowe rezultaty tylko wtedy, gdy wszechświat przypomina zamknięte pudełko (lub wnętrze czarnej dziury), z którego energia nie ma ucieczki. Trudno w to uwierzyć, lecz w latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych - z przyczyn, które nie mają nic wspólnego z teorią Wheelera-Feynmana - astronomowie znaleźli przekonujące dowody, że wszechświat rzeczywiście jest „zamknięty”⁶¹.

Obecnie nie ma żadnych sprzeczności między teorią absorbera Wheelera-Feynmana a kosmologią. Niektórzy teoretycy przypuszczają nawet, że istnieje związek między ekspansją wszechświata, a faktem, że obserwujemy wyłącznie fale opóźnione poruszające się w przyszłość, a nie fale przedwczesne zbiegające się w kierunku naładowanych cząstek. Koncepcja Wheelera i Feynmana stanowi najlepsze wytłumaczenie istnienia oporu radiacyjnego oraz wymiany fotonów między naładowanymi cząstkami, aczkolwiek niełatwo to dostrzec na wykładach z fizyki, które oferuje większość uniwersytetów i innych szkół wyższych. Zdziwiałe, ale w pewnym sensie starożytni mieli rację - nasze oczy **r z e c z y w i ś c i e** emitują fotony, w ramach wymiany

⁶¹ Aczkolwiek jeden z koronnych dowodów na to, że wszechświat jest zamknięty - istnienie tak zwanej ciemnej materii - nie został jeszcze bezpośrednio potwierdzony (przyp. tłum.).

fotonów między źródłem światła a okiem. Jednak podobnie jak trajektorie fotonów odbijających się od lustra pod dziwnymi kątami w ostatecznym rachunku znikają, także fotony wysyłane przez oko nie ujawniają swego istnienia w realnym świecie. Istotnym aspektem, do którego jeszcze powrócimy, jest fakt, że tradycyjny obraz fotonu poruszającego się od źródła światła w kierunku naszych oczu (lub dokądkolwiek) jest niekompletny. Czas nie ma dla fotonu znaczenia. Wszystko, co możemy powiedzieć, to to, że między źródłem światła a naszym okiem (lub jakimkolwiek innym odbiornikiem) zaszła wymiana fotonów.

Niektóre z tych zjawisk mogą wydawać się dziwne, lecz wszystko, co opisałem w tym rozdziale, opiera się na faktach oraz teoriach, które wytrzymały próbę czasu i stanowią kanon współczesnej fizyki. Za kilka lat szczególna teoria względności będzie obchodziła setne urodziny, a QED zbliża się do pięćdziesiątki. Obie stanowią fundament nauki, obie były wielokrotnie weryfikowane przez eksperyment i obie są zrozumiałe dla współczesnych fizyków (przynajmniej w sensie umiejętności wykonywania obliczeń). Jeżeli chcemy naprawdę znaleźć interpretację fizyki kwantowej, która pozwoliłaby nam zrozumieć, w jaki sposób naprawdę działa świat - czym w istocie jest rzeczywistość - to musimy wyjaśnić jeszcze wiele innych dziwnych rzeczy. Niektóre z nich są związane ze starymi pomysłami, które dopiero niedawno poddano doświadczałnej weryfikacji, są też takie, które jeszcze nie przeszły przez tę próbę. Jakkolwiek dziwne i niesamowite mogą się wydawać, wszystkie te zjawiska są realne i prawdziwe.

Rozdział trzeci

Dziwne, lecz prawdziwe

Jednym z najbardziej zadziwiających zjawisk kwantowego świata w ogólności, a światła w szczególności jest właściwość zwana polaryzacją. Na pierwszy rzut oka polaryzacja robi wrażenie zwykłej cechy poruszającej się fali, a wyjaśnienie polaryzacji w kategoriach falowych było jednym z pierwszych sukcesów teorii Maxwella. Wyobraźmy sobie ponownie, że trzymamy w ręce naciągniętą linę, której drugi koniec jest przywiązany do drzewa. Potrząsając ręką w górę i w dół, możemy wytworzyć rozchodzącą się od ręki w kierunku drzewa falę w postaci pionowych drgań naciągniętej liny. Będzie to fala spolaryzowana pionowo. Potrząsając ręką na boki, możemy posłać w kierunku drzewa podobną falę, lecz tym razem drgania naciągniętej liny będą odbywać się w płaszczyźnie poziomej. Ta fala będzie spolaryzowana poziomo.

Nieco trudniej wyobrazić sobie polaryzację systemu utworzonego z dwu fal składowych ustawionych pod kątem prostym względem siebie (czyli składowej elektrycznej i magnetycznej)⁶², natomiast analogia z drgającą liną całkowicie się załamuje, gdy rozważamy falę w kategoriach fotonów. Istotne jest jednak to, że nawet z pojedynczym fotonem związany jest wyróżniony kierunek polaryzacji. Z braku lepszej analogii możemy sobie wyobrazić, że każdy foton niesie strzałkę lub wskaźnik ustawiony pionowo (w przypadku pionowej polaryzacji), poziomo (w przypadku polaryzacji poziomej) czy w jakimkolwiek innym pośrednim kierunku (w przypadku światła spolaryzowanego pod jakimś pośrednim kątem). Aby odróżnić polaryzację poziomą od pionowej, w dalszej części tego rozdziału będziemy rozważać wiązki światła rozchodzące się poziomo, lecz wszystkie przedstawione tu argumenty stosują się równie dobrze do światła biegnącego w dowolnym kierunku.

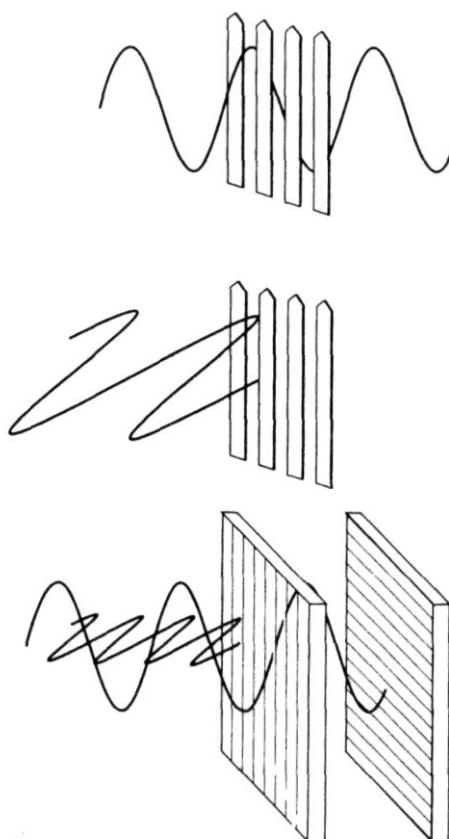
Zwykłe światło słoneczne lub pochodzące z typowej żarówki nie jest spolaryzowane. Wskaźniki na poszczególnych fotonach ustawione są w przypadkowych kierunkach, a ponieważ liczba fotonów jest olbrzymia, żaden określony kierunek nie jest wyróżniony. Wytworzenie spolaryzowanego światła jest jednak bardzo łatwe, wystarczy spowodować, by przeszło przez substancję, która przepuszcza tylko fotony o określonej orientacji. Powracając do analogii z liną: gdyby lina rozciągnięta między moją ręką a drzewem przechodziła po drodze przez pionową szczelinę między sztachetami w wysokim drewnianym płocie, to nadal mógłbym posłać wzdłuż liny pionowo spolaryzowaną falę, która bez przeszkód dotarłaby do drzewa po drugiej stronie płotu, gdyż pionowe drgania liny zmieściłyby się w szczelinie między sztachetami. Ale fala spolaryzowana poziomo nie dotarłaby do drzewa - poziomo drgająca lina nie mogłaby poruszać się swobodnie w pobliżu płotu, gdyż uderzałaby o sztachety.

⁶² Wystarczy umówić się, że kierunek polaryzacji wyznacza jedna z dwu składowych. Fizycy na ogół wybierają kierunek drgań pola elektrycznego (składowej elektrycznej) jako kierunek polaryzacji (przyp. tłum.).

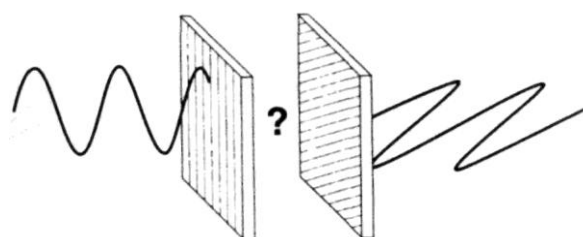
W przyrodzie występują substancje polaryzujące światło, między innymi kryształ zwany kalcytem. Możemy wyobrazić sobie mechanizm podobny do opisanej powyżej polaryzacji na płocie, gdy fale świetlne napotykają uporządkowane warstwy atomów w kryształach. Sztuczne polaryzatory są dzisiaj powszechnie dostępne, na przykład w postaci okularów firmy Polaroid. Okulary te są bardzo przydatne przy prowadzeniu samochodu w niekorzystnych warunkach świetlnych. Po pierwsze, przepuszczają one tylko fotony o określonej polaryzacji, odcinając pozostałe fotony i tym samym redukując jasność światła docierającego do oczu. Po drugie, światło odbite od poziomej powierzchni jest częściowo spolaryzowane poziomo, więc jeżeli okulary zostaną wykonane tak, aby przepuszczały tylko pionowo spolaryzowane światło, to odetną one znaczną część odbitych od jezdni fotonów. Z obu powyższych powodów okulary te mogą być przydatne w czasie jazdy w nocy (gdyż zmniejszają blask odbitych od nawierzchni drogi światła nadjeżdżających z naprzeciwka samochodów), a także przy silnym Słońcu w dzień.

Zobaczyć niemożliwe światło

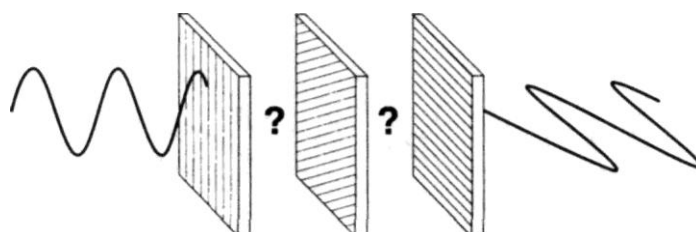
Zwykłe okulary firmy Polaroid przepuszczają tylko pionowo spolaryzowane fotony, więc jeżeli zdejmujemy je i ustawimy pionowo (tak, aby szkła znajdowały się jedno nad drugim, a nie jedno obok drugiego), to przepuszczają one wyłącznie poziomo spolaryzowane światło. W naszej analogii z liną i płótnem odpowiadałoby to sytuacji, w której sztachety są ustawione poziomo, a nie pionowo. Poziomo spolaryzowane światło nie może przejść przez pionowo zorientowany polaryzator. Jest więc oczywiste, że jeśli weźmiemy dwie pary okularów Polaroida, jedną parę założymy, a drugą parę będziemy trzymać przed oczami w ten sposób, aby szkło było przekręcone o 90 stopni, to przez ustawione w szereg dwa szkła nie zobaczymy nic. (Czytelnik zechce sam spróbować i zobaczyć, a raczej nie zobaczyć!). Chociaż raz fotony zachowują się zgodnie ze zdrowym rozsądkiem. Jest to przypadek pary „skrzyżowanych” polaryzatorów. Triumf zdrowego rozsądku jest jednak krótkotrwały. Nasze codzienne doświadczenie mówi nam, że skoro mamy dwa szkła, ustawione w ten sposób, że światło w ogóle przez nie nie przechodzi, to po wstawieniu między nie trzeciego szkła światło nadal nie będzie mogło przedostać się do oka. Tym razem zdrowy rozsądek zawodzi. Skrzyżujmy ponownie kierunki polaryzacji dwu szkieł, weźmy trzecią parę okularów i umieśćmy ją pomiędzy tamtymi dwoma w ten sposób, aby kierunek polaryzacji środkowego szkła był ustawiony pod kątem 45 stopni w stosunku do pozostałych dwóch. Bez trzeciego (środkowego) szkła światło w ogóle nie przechodzi, natomiast gdy wstawimy trzecie w opisany wyżej sposób, to pewna część światła przedostanie się do oka. Nie tak dużo, jak przez jedno szkło (w rzeczywistości tylko czwarta część), lecz z całą pewnością trochę światła przechodzi przez trzy ustawione w szereg szkła, podczas gdy przez dwa nie. Dlaczego tak się dzieje?



Ryc. 14. Jeżeli światło jest falą, to łatwo zrozumieć, w jaki sposób „pionowo spolaryzowane” światło może przedostać się przez substancję polaryzującą, przedstawioną tutaj jako płot ze sztachetami (rycina górna). Poziomo spolaryzowane światło nie przedostanie się pomiędzy sztachetami (rycina środkowa). Dwa polaryzatory „skrzyżowane” pod kątem prostym zatrzymają światło spolaryzowane zarówno poziomo, jak i pionowo (rycina dolna)



Ryc. 15. O dziwo, jeżeli drugi polaryzator jest ustawiony pod kątem 45 stopni względem pierwszego, to nie blokuje on pionowo spolaryzowanego światła. Dokładnie połowa światła przechodzi, spolaryzowana pod kątem 45 stopni



Ryc. 16. Z jeszcze dziwniejszymi rzeczami mamy do czynienia przy trzech polaryzatorach, z których każdy przekręcony jest kolejno o 45 stopni względem poprzedniego. Jedna czwarta światła przechodzi z polaryzacją poziomą - mimo że nie przeszłoby n i c, gdybyśmy usunęli środkowy polaryzator!

Zacznijmy od prostszej sytuacji, gdy mamy tylko dwa polaryzatory ustawione pod kątem 45 stopni. Odłóżmy już okulary i weźmy pojedyncze laboratoryjne polaryzatory stosowane w precyzyjnych eksperymentach, w których dokładnie mierzy się kąty i natężenia wiązek światła. Załóżmy, że po przejściu przez pierwszy polaryzator światło jest spolaryzowane pionowo. Co się stanie, gdy napotka ono drugi polaryzator, którego „sztachety” ustawione są pod kątem 45 stopni do pionu?

Na podstawie analogii z liną i płótnem doszlibyśmy do wniosku, że przez drugi polaryzator nic się nie przedostanie. W rzeczywistości dokładnie połowa pionowo spolaryzowanego światła przechodzi, a to, co się wyłania po drugiej stronie, jest spolaryzowane pod kątem 45 stopni, równoległe do sztachet drugiego polaryzatora. Jeżeli teraz natrafi ono na trzeci polaryzator, skrzyżowany z pierwszym (a więc o poziomej polaryzacji), to kąt między kierunkiem polaryzacji światła a kierunkiem polaryzacji trzeciego polaryzatora wynosi także 45 stopni. Jak poprzednio, połowa światła przechodzi, lecz teraz światło po przejściu przez trzeci polaryzator jest spolaryzowane poziomo! Po przejściu przez dwa odpowiednio ustawione polaryzatory pionowo spolaryzowane światło zostało czterokrotnie osłabione (połowa z połowy pierwotnego natężenia), a jego kierunek polaryzacji został przekręcony w ten sposób, że jest teraz ustawiony poziomo.

Eksperyment ten można wykonać z wiązką światła tak słabą, że tylko jeden foton naraz przechodzi przez skrzyżowane polaryzatory. Podobnie jak w doświadczeniu z dwiema szczelinami, można posyłać pojedyncze fotony przez układ polaryzatorów. Okazuje się, że spolaryzowany pionowo foton (czyli foton, który przeszedł przez pionowo zorientowany polaryzator) ma 50% szansy na przejście przez polaryzator ustawiony pod kątem 45 stopni w stosunku do pionu (i zarazem 50% szansy, że zostanie zatrzymany). Jeżeli 100 „pionowo spolaryzowanych” fotonów przepuścimy przez drugi obszar układu eksperymentalnego, to 50 z nich zostanie zatrzymanych, a drugie 50 przepuszczonych, lecz jeśli zbadamy polaryzację tych przepuszczonych, to okaże się, że są one teraz spolaryzowane pod kątem 45 stopni. 25 spośród tych 50 zostanie zatrzymanych po przejściu przez kolejny polaryzator, ustawiony poziomo, 25 przejdzie, a ich polaryzacja będzie tym razem pozioma.

Można oczywiście wykonać ten sam eksperyment z dwoma polaryzatorami ustawionymi pod dowolnym kątem względem siebie. Jeżeli oba będą ustawione pionowo, to wszystkie pionowo spolaryzowane fotony przejdą. Jeżeli polaryzatory będą ustawione pod kątem prostym (skrzyżowane), to żaden foton nie przejdzie. Dla każdego kąta między kierunkami polaryzacji obu polaryzatorów istnieje określona proporcja - zmieniająca się płynnie od 100% do zera - między liczbą fotonów, które pokonają drugi polaryzator, a liczbą tych, które przechodzą przez pierwszy. Wygląda na to, że każdy „pionowo spolaryzowany” foton ma dobrze określone prawdopodobieństwo, że jest spolaryzowany pod innym kątem - ma on zerową szansę na polaryzację poziomą, ale 50% szansy na polaryzację pod kątem 45 stopni, mniejszą szansę na, powiedzmy, kąt 30 stopni (w stosunku do poziomu) i większą na 60 stopni. W rzeczywistości foton znajduje się w stanie nieokreślonym, w jednej z owych superpozycji, dopóki nie zostanie wykonany

miar polaryzacji. Dopiero wtedy „decyduje się”, czy jest spolaryzowany w odpowiednim kierunku i przechodzi (lub nie) zgodnie ze ścisłymi regułami prawdopodobieństwa. Jak ujął to Paul Davies:

Należy podkreślić, iż kwantowa nieokreśloność nie oznacza bynajmniej, że nie wiemy, jaka jest polaryzacja fotonu, lecz że samo pojęcie „fotonu z określoną polaryzacją” nie istnieje. Nieokreśloność dotyczy samej n a t u r y fotonu, a nie tylko naszej wiedzy o nim⁶³.

Ale to jeszcze nie wszystko.

Kryształ kalcytu różni się od okularów firmy Polaroid pod jednym istotnym względem. Gdy światło oddziałuje z kryształem, nie wylania się z niego jako pojedyncza spolaryzowana wiązka. Kryształ rozszczepia światło na dwie wiązki - spolaryzowane pod kątem prostym względem siebie - które wylaniają się po drugiej stronie w pewnej odległości od siebie. Pionowo spolaryzowane światło podąża przez kryształ jedną drogą, a światło spolaryzowane poziomo inną. Jeżeli światło wpadające do kryształu zostanie uprzednio spolaryzowane pod kątem 45 stopni (czyli przepuszczone przez polaryzator ustawiony pod kątem 45 stopni), to po przejściu przez kryształ kalcytu otrzymamy dwie jednakowo silne wiązki. Jedna z nich będzie spolaryzowana poziomo, a druga pionowo. Gdy pojedynczy foton przechodzi przez kryształ, musi on oczywiście „zdecydować się”, którą ścieżką podąży. Zostało eksperymentalnie sprawdzone, że zawsze wylania się on z jednego z dwóch kanałów z odpowiednią polaryzacją.

Jeżeli na drodze dwóch wiązek światła wylaniających się z kryształu kalcytu umieści się odpowiednio ustawiony drugi kryształ, to obie wiązki - pionowo i poziomo spolaryzowana - zostaną połączone wewnątrz tego drugiego kryształu z powrotem w jedną wiązkę spolaryzowaną pod kątem 45 stopni. Takie dwa kryształy są „przeciwstawne”, w sensie ich struktury krystalicznej, a także w sensie oddziaływania na światło.

Jaki jest zatem los pojedynczego fotonu biegnącego przez układ dwóch kryształów? Gdy pada on na pierwszy kryształ, musi oczywiście „zdecydować”, którym kanałem podąży, co wiąże się także z wyborem określonej polaryzacji.

Aby wykazać, że foton rzeczywiście dokonuje tego wyboru, ponownie zmodyfikujemy nasz układ dwóch kryształów, blokując jedną z dwóch dróg. W tym celu pomiędzy dwoma kryształami umieścimy kawałek czarnego materiału w taki sposób, aby zatrzymał jedną z dwu wiązek światła, ale bez przeszkód przepuścił drugą. Przypuśćmy, że wszystkie poziomo spolaryzowane fotony, wylaniające się z pierwszego kryształu, zostaną w ten sposób zatrzymane. Spośród fotonów padających na pierwszy kryształ tylko połowa przedostanie się przez cały układ - wylonią się one po przejściu drugiego kryształu jako pionowo spolaryzowana wiązka. Taki sam rezultat uzyskamy, gdy zablokujemy pionowo spolaryzowaną wiązkę i przepuścimy tylko poziomo spolaryzowane fotony. Wszystko to zostało zbadane i potwierdzone eksperymentalnie, ku satysfakcji zdrowego rozsądku.

⁶³ P. Davies, *Other Worlds*, s. 121.

Co się zatem stanie, gdy usuniemy przeszkodę blokującą jeden z kanałów i pozwolimy fotonom swobodnie przejść przez układ, lecz będziemy przepuszczać je pojedynczo? Zdrowy rozsądek mówi, że będą one wszystkie przechodzić na drugą stronę i wyłaniać się z drugiego kryształu, a ich polaryzacja będzie albo pionowa, albo pozioma z jednakowym prawdopodobieństwem. Gdy foton już „zdecyduje”, którym kanałem podąży, to trudno oczekiwać, żeby po przejściu układu powrócił do pierwotnej polaryzacji 45 stopni. Okazuje się jednak, że powraca! Gdy wiązka jest tak słaba, że fotony przechodzą przez układ pojedynczo, światło zachowuje się tak, jakby indywidualny foton rozdzielał się na dwa, podążał oboma kanałami, a następnie łączył się ponownie i powracał do pierwotnej polaryzacji. Każdy foton padający na pierwszy kryształ przechodzi przez układ eksperymentalny i wyłania się po drugiej stronie z pierwotną polaryzacją. Fale prawdopodobieństwa sprawdzają każdą możliwą drogę z jednej strony układu kryształów na drugą i biorą pod uwagę cały układ, zanim „zdecydują”, w jaki sposób powinny się zachować, podobnie jak w przypadku odbicia od lustra „decydują”, w jaki sposób powinny się odbić. Wygląda na to, że pojedynczy foton podążający jedną z dróg przez układ doświadczalny jest świadomy tego, czy drugi kanał jest zablokowany czy nie, i odpowiednio modyfikuje swoje zachowanie.

Wszystkie te zjawiska są znane od dziesiątków lat i pozostają w całkowitej zgodności z teorią kwantów. W latach dziewięćdziesiątych eksperymentatorzy wymyślili jednak jeszcze bardziej subtelne testy pokazujące, że foton może zachowywać się równocześnie jak fala i jak cząstka.

Wyjaśnianie światła

Jedną z podstawowych koncepcji standardowej interpretacji mechaniki kwantowej - interpretacji kopenhaskiej - jest idea komplementarności wprowadzona przez Nielsa Bohra. Mówi ona, że obiekty kwantowe, takie jak foton, mają wprawdzie dualną, falowo-korpuskularną naturę, lecz żaden eksperyment nie uwidoczni obu tych aspektów równocześnie. Jak powiedział Bohr, wykonując eksperymenty zaprojektowane w celu badania falowych właściwości światła, zobaczy się fale, a w wyniku eksperymentów zaprojektowanych w celu badania fotonów jako cząstek - wykryje się fotony. Nigdy jednak nie stwierdzi się, że światło zachowuje się równocześnie jak fala i jak cząstka.

Okazuje się, że Bohr był w błędzie. W 1992 roku japońscy naukowcy wykonali eksperyment zaproponowany wcześniej przez zespół z Indii i uzyskali dokładnie taki wynik: pojedyncze fotony przejawiające równocześnie właściwości falowe i korpuskularne.

Nie jest jasne, jakie znaczenie będzie miało to odkrycie dla naszego zrozumienia kwantowego świata. Jedno jest pewne - to źle wróży interpretacji kopenhaskiej w jej standardowej formie. Mimo to nie widzę powodu do nadmiernej ekscytacji, ponieważ jest dosyć oczywiste, przynajmniej dla mnie, że interpretacja kopenhaska bynajmniej nie stanowi najlepszego modelu kwantowej rzeczywistości. Warto jednak przyjrzeć się bliżej samemu eksperymentowi, gdyż stanowi on jeden z przykładów dziwaczności kwantowego świata.

Jednym z najbardziej zdumiewających aspektów tej historii jest fakt, że zanim fizycy mogli się zabrać do badania falowej natury fotonów, musieli najpierw wykazać, w latach osiemdziesiątych,

że fotony rzeczywiście istnieją. Jak już wspomniałem, Albert Einstein posłużył się koncepcją fotonu (sama nazwa powstała wszelako nieco później) dla wyjaśnienia zjawiska fotoelektrycznego, za co otrzymał zasłużoną Nagrodę Nobla. W latach pięćdziesiątych i później kilku badaczy, począwszy od Davida Bohma (do którego jeszcze powrócimy), zdało sobie sprawę, że zjawisko fotoelektryczne można jednak wytłumaczyć bez konieczności odwoływania się do fotonów! Jeżeli potraktuje się światło jako zmienne pole elektromagnetyczne oddziałujące z powierzchnią metalu składającą się z pojedynczych atomów, które mogą przyjmować określone ilości energii, to można uzyskać zadowalające wyjaśnienie zjawiska fotoelektrycznego. Planck byłby zachwycony, a Nagroda Nobla okazałaby się niezasłużona przez Einsteina (przynajmniej nie za to, za co ją otrzymał). Obecnie jest to jednak tylko ciekawostka z historii nauki, ponieważ eksperymentatorzy, częściowo pod wpływem tych nowych idei, w końcu udowodnili, że fotony istnieją.

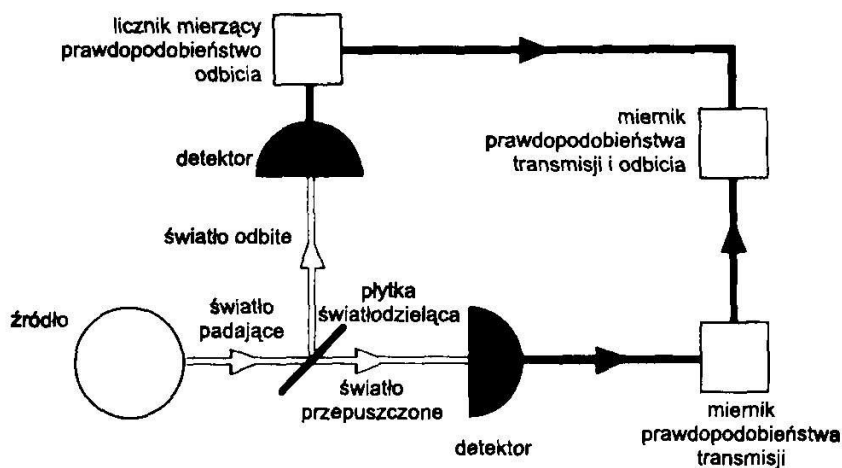
Aby wyprodukować pojedynczy foton, nie wystarczy użyć kontaktu ze ściemniaczem i zredukować światło do tak nikłego natężenia, że żarówka będzie wysyłać fotony pojedynczo. Problem polega częściowo na tym, że światło jest emitowane przez wiele atomów, a częściowo na tym, że pojedyncze atomy mają pewien „wybór” co do tego, które poziomy energii (a raczej przejścia pomiędzy nimi) biorą udział w wytwarzaniu promieniowania. Energia wytwarzanego światła musi skądś pochodzić - powstaje ona z przeskoków elektronów z wyższych poziomów energii na niższe, w wyniku czego elektrony tracą energię na rzecz światła. W większości wypadków światło powstaje w wyniku wielu tego rodzaju przeskoków, pomiędzy wieloma różnymi poziomami. Uśrednianie prawdopodobieństw wszystkich możliwych przeskoków (podobnie jak uśrednianie związane z całkowaniem po trajektoriach Feynmana) może w rezultacie dać impuls światła o energii mniejszej niż energia pojedynczego fotonu, ponieważ stanowi on średnią wielu stanów kwantowych (superpozycję, podobnie jak „żywo-martwy” kot), z których większość jest pusta i zawiera zero fotonów! Te dziwne impulsy zachowują się jak fale i można je zmusić do wzajemnej interferencji w odpowiednio subtelnie przygotowanych eksperymentach.

Aby wyprodukować rzeczywiście pojedynczy foton, trzeba zmusić pojedynczy atom do wyemitowania dokładnie jednego impulsu energii w wyniku pojedynczego przejścia pomiędzy dobrze określonymi poziomami energii. Nie ma wtedy szansy na żadne superpozycje i foton pojawia się w postaci pojedynczego, czystego stanu kwantowego. Eksperymentatorzy potrafią to uzyskać dzięki specjalnej technice, w której atom wapnia jest wzbudzany za pomocą światła lasera. Jeżeli wyobrazimy sobie elektrony w atomie jako cząstki spoczywające na różnych stopniach drabiny energetycznej, to powyższa technika odpowiada przeniesieniu jednego elektronu o dwa stopnie wyżej na tej drabinie. Przez małą chwilę będzie on się kolebał na krawędzi górnego stopnia, następnie spadnie, najpierw na pośredni poziom, a potem (po chwili trwającej zaledwie 4,7 miliardowych części sekundy) z powrotem na swoje miejsce. Każdy skok w dół wyzwala energię w postaci fotonu.

Aby złapać taki pojedynczy foton, wzbudzony atom wapnia jest monitorowany przez detektor, który wykrywa pierwszy foton (ten, który powstaje w wyniku przejścia elektronu z górnego poziomu

na pośredni) i otwiera na krótką chwilę „bramkę”, aby przepuścić drugi foton. Bramka pozostaje otwarta przez okres dopasowany do okresu, w ciągu którego atom pozostaje w pośrednim stanie energii, więc gdy drugi foton zostaje wyemitowany, przechodzi przez bramkę i trafia do układu eksperymentalnego.

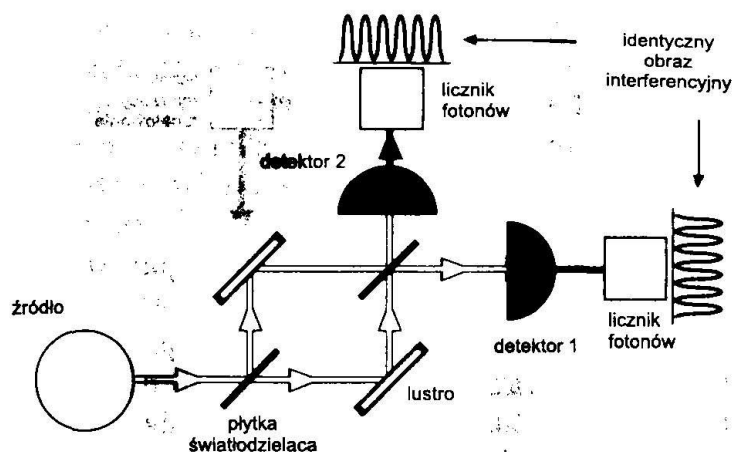
Do pionierów tego rodzaju badań w latach osiemdziesiątych należeli Alain Aspect i Philippe Grangier, pracujący w Paryżu. Wyprodukowane w ten sposób fotony posyłali oni w kierunku swego rodzaju lustra zwanego płytką światłodzielną, które przepuszcza połowę światła, a drugą połowę odbija pod pewnym kątem. Przypomina to trochę rozszczepianie wiązki światła przez kryształ kalcytu, aczkolwiek w tym wypadku nie mamy do czynienia z efektami polaryzacyjnymi. Nietrudno zrozumieć, jak wiązka światła może zostać w ten sposób podzielona na dwie. Wiązki światła z konwencjonalnych źródeł mogą być rozdzielane przez płytkę światłodzielną, a następnie łączone z powrotem, w wyniku czego dochodzi do interferencji. Falowa natura światła została w ten sposób wielokrotnie potwierdzona, a eksperymenty tego rodzaju zostały wykonane także z pochodzącym z konwencjonalnych źródeł światłem o tak małym natężeniu, że odpowiada ono ułamkowi pojedynczego fotonu. Gdy jednak do płytki światłodzielną dociera cząstka, musi zostać albo przepuszczona, albo odbita, nie może zająć jedno i drugie.



Ryc. 17. Czy pojedynczy foton można rozciąć na dwoje? Jeżeli światło jest rzeczywiście strumieniem cząstek, to każdy foton padający na płytkę światłodzielną powinien albo przejść, albo ulec odbiciu. Zgodnie z teorią kwantową liczniki powinny zarejestrować idealną antykorelację

Gdy na drodze obu wiązek wychodzących z płytki światłodzielną zostaną umieszczone detektory i przez układ przepuści się pojedyncze fotony ze wzbudzonego atomu wapnia, to okazuje się, że fotony zawsze podążają albo jedną ścieżką, albo drugą. Nigdy nie zaobserwowano równoczesnego sygnału detektorów w obu kanałach, co sugerowałoby, że połowa światła podążyła każdym z dwóch kanałów.

To jeszcze nie koniec. Zgodnie z tym, co powiedział Bohr, gdy Aspect i Grangier szukali cząstek, to znaleźli cząstki. Co by się jednak stało, gdyby poszukali fali, chociaż wiedzieli, że atomy wapnia emitują fotony?



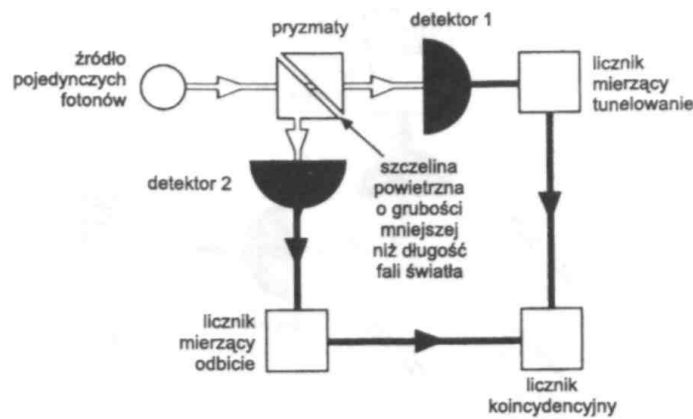
Ryc. 18. Gdy jednak wiązki z eksperymentu pokazanego na rycinie 17 zostaną połączone w drugiej płytce światłodzielną (która działa teraz odwrotnie do pierwszej, łącząc obie wiązki), dają one obraz interferencyjny, co dowodzi, że nawet pojedyncze fotony zachowują się jak fala

Aby się przekonać, zastąpili detektory lustrami, które połączyły wiązki światła rozszczepione przez płytkę światłodzielną. Jest to w gruncie rzeczy powtórka doświadczenia z dwiema szczelinami i rzeczywiście okazało się, że w miarę jak przez układ przechodziło coraz więcej fotonów, pojawiała się charakterystyczna struktura interferencyjna odpowiadająca falowej naturze światła.

Stosując to samo źródło światła, paryski zespół mógł badać albo falowe, albo korpuskularne aspekty promieniowania w doskonałej zgodzie z zasadą komplementarności Bohra. Jednak ledwo ich publikacje „wyszły spod prasy”, trzech indyjskich naukowców zasugerowali eksperyment, który mógłby zademonstrować p o j e d y n c z e fotony zachowujące się r ó w n o c z e ś n i e jak cząstki i fale.

Liderem indyjskiego zespołu był Dipankar Home z Instytutu Bosego, a jego współpracownicy to Partha Ghose, również z Instytutu Bosego, oraz Girish Agarwal z uniwersytetu w Hajdarabadzie. Zasadniczym elementem ich pomysłu było zastąpienie lustrzanej płytki światłodzielną przez inny rodzaj układu światłodzielnego - zbudowanego z dwóch pryzmatów ustawionych tak, że niemal się dotykają.

Są to zwykłe pryzmaty, wykonane z przezroczystego materiału i wycięte w kształcie równoległościanu o podstawie trójkąta prostokątnego. Gdy światło pada prostopadłe na boczną ściankę pryzmatu, przyległą do przyprostokątnej trójkąta, to trafia na ściankę przyległą do przeciwprostokątnej pod kątem 45 stopni, ulega całkowitemu odbiciu wewnątrz pryzmatu (odbity promień oddala się pod kątem prostym do padającego) i wyłania się z drugiej przyprostokątnej ścianki.



Ryc. 19. W jednej z wersji tego eksperymentu płytka światłodzielną została zastąpiona przez dwa pryzmaty oddzielone cienką warstwą powietrza. Światło może pokonać szczelinę powietrzną jedynie dzięki tunelowaniu, które jest zjawiskiem falowym. Licznik koincydencji nadal jednak rejestruje idealną antykoincydencję, co wskazuje na właściwości cząstkowe. Fotony zostały przyłapanane na jednoczesnym zachowaniu falowym i cząstkowym

Jeżeli zetknie się oba pryzmaty w ten sposób, aby przeciwprostokątne ścianki ściśle do siebie przylegały, to powstanie jednorodny blok w kształcie prostopadłościanu. Światło padające na taki blok pod kątem prostym do jednej ze ścian przechodzi na wylot bez żadnych przeszkód. Gdy jednak między dwiema przeciwprostokątnymi ścianami powstanie mały odstęp (szczelina), to część światła zostanie odbita, a część tuneluje przez szczelinę i podąża dalej po linii prostej.

Szczelina musi być rzeczywiście bardzo mała, żeby uzyskać taki efekt - mniejsza niż długość fali światła. Część światła przechodzi wtedy na drugą stronę tak, jakby szczeliny w ogóle nie było. Jak zwykle decyduje statystyka i prawdopodobieństwa - im węższa szczelina, tym większa część światła tuneluje - więc dla danej długości fali i pewnej ściśle określonej szerokości szczeliny dokładnie połowa światła zostanie przepuszczona, a połowa odbita. Kluczowy jest jednak fakt, że tylko fale mogą tunelować w taki sposób. Cząstki nie tunelują.

Eksperyment z płytką światłodzielną w powyższej wersji przeprowadzili Yutaka Mizobuchi i Yoshiyuki Ohtake z centrum badawczego Hamamatsu Photonics w miejscowości Hamakita. Trudności, jakie musieli pokonać, wynikały nie tylko z faktu, że szerokość szczeliny musiała być ustalona z dokładnością do kilkudziesięciu miliardowych metra, co odpowiada około jednej dziesiątej długości fali użytego przez nich światła. Tak jak poprzednio, w miejscach, gdzie wyłaniają się dwie wiązki światła - odpowiadające fotonom, które przeszły na wprost, oraz tym, które zostały odbite - ustawiono detektory. Fotony nie mogą się podzielić na połowę, więc mamy dokładnie 50% szansy, że pojedynczy foton zostanie odbity przez szczelinę lub że przejdzie na drugą stronę. Zatem jeżeli dwa liczniki będą tykały w anty koincydencji (czyli nigdy oba w tej samej chwili), to będziemy mieć dowód, że światło porusza się przez układ w postaci fotonów.

Te fotony, które przechodzą przez szczelinę na wprost, mogą tego dokonać jedynie dzięki tunelowaniu, czyli jako fale. Przeprowadziwszy eksperyment, badacze rzeczywiście stwierdzili, że do każdego kanału trafia połowa wszystkich fotonów, co potwierdza hipotezę, że niektóre fotony tunelują. Okazało się także, że detektory dają sygnał w idealnej anty koincydencji, co z kolei potwierdza przypuszczenie, że fotony - jako cząstki - nie rozszczepiają się na dwie części przy

przejściu przez szczelinę. Jest to więc eksperyment, w którym te same fotony zachowują się równocześnie jak fale i jak cząstki (gdy docierają do szczeliny), zaprzeczając fundamentalnej przesłance zasady komplementarności Bohra. „Trzy wieki po Newtonie musimy przyznać, że nadal nie znamy odpowiedzi na pytanie «czym jest światło»" - mówi Home, z satysfakcją przypominając uwagę Alberta Einsteina w liście do starego przyjaciela, Michelangela Bessa, napisanym w 1951 roku: „Pięćdziesiąt lat rozmyślań nie przybliżyło mnie do odpowiedzi na pytanie, czym są kwanty światła. Dzisiaj każdy Tom, Dick i Harry sądzi, że zna tę odpowiedź, ale wszyscy oni się mylą"⁶⁴. Uwaga ta będzie tym bardziej aktualna, gdy wykonany zostanie eksperyment (czyli dotychczas, do 1994 roku, nie zrealizowany) zaproponowany przez naukowców z Nowej Zelandii, który - jeśli mechanika kwantowa jest słuszna - pokaże pojedynczy foton w dwóch miejscach równocześnie.

Dwoi się w oczach

Foton nie może oczywiście być w dwóch miejscach równocześnie, lecz jedynie zrobić takie wrażenie - jest to jeszcze jeden przykład kwantowej nielokalności, tego „widmowego działania na odległość", które tak niepokoiło Einsteina.

Proponowany eksperyment będzie się składał nie z jednego, lecz z aż trzech płytek światłodziących, ustawionych w układzie przypominającym piramidę. Wiązka światła będzie rozszczepiana na dwie przez pierwszą płytkę światłodziącą, a następnie dwie wiązki w dwóch kanałach wyjściowych będą odchylane w kierunku pozostałych dwóch płytek światłodziących, gdzie ponownie zostaną rozszczepione. W rezultacie powstaną cztery wtórne wiązki odpowiadające czterem możliwym ścieżkom, jakie może wybrać foton. W każdym z czterech kanałów wyjściowych zostaną umieszczone czułe detektory rejestrujące przybycie każdego fotonu, który dotrze do poszczególnych stacji końcowych.

Nietrudno przewidzieć, jaki będzie los wiązki fal elektromagnetycznych wpuszczonej do tego układu. Zostanie ona rozszczepiona na dwie przez pierwszą płytkę, a następnie każda połowa zostanie ponownie rozszczepiona, gdy napotka drugą płytkę. Z układu wyłonią się cztery wiązki, każda czterokrotnie słabsza od pierwotnej i wszystkie cztery w tej samej fazie.

Jak dotąd wszystko jest jasne, ale nie na tym polega idea eksperymentu. Wszystko, co do tej pory zmontowaliśmy, ma służyć jako układ wiązki odniesienia, które mogą zostać użyte do monitorowania zachowania pojedynczych fotonów - poprzez śledzenie ich interferencji - wpuszczanych do układu z innego źródła. Daniel Wallis i jego współpracownicy z uniwersytetu w Auckland proponują ustawienie wyżej opisanego układu, a następnie posyłanie pojedynczych fotonów w kierunku pierwszej płytki światłodziącej. Fotony te będą padać na płytkę pod kątem prostym do wiązki odniesienia, lecz nie zmienia to zachowania płytki, która powinna z jednakowym prawdopodobieństwem posyłać fotony w jeden z dwóch kanałów, w kierunku pary wtórnych płytek.

Teraz zaczyna się interesująca część doświadczenia. Jeżeli założymy, że w układ nie jest wstrzykiwany żaden foton (nie licząc wiązki odniesienia), to moglibyśmy dojść do wniosku, że

⁶⁴ Oba cytaty zaczerpnięto z: D. Home, J. Gribbin, *What is light*, „New Scientist", 2 listopada 1991.

żaden z czterech detektorów nie zarejestruje ani jednego fotonu. Okazuje się, że wniosek ten jest błędny. Podobnie jak elektronowi wolno spontanicznie emitować fotony, pod warunkiem że są one dostatecznie szybko pochłaniane z powrotem, również próżnia może spontanicznie produkować fotony pod warunkiem że znikają one dostatecznie szybko. Jest to właściwość kwantowego świata nosząca nazwę nieokreśloności - gdyby prawdopodobieństwo znalezienia fotonu w jakimś określonym obszarze przestrzeni wynosiło dokładnie zero, to byłoby ono określone z absolutną dokładnością, co jest sprzeczne z kwantowymi regułami. Zawsze musi być niewielka szansa na to, że foton pojawi się w dowolnie wybranym miejscu. Wszystko, co nie jest zabronione przez kwantowe reguły, wydaje się dozwolone i rzeczywiście te tak zwane kwantowe fluktuacje próżni są dobrze znanym zjawiskiem kwantowego świata.

Tak więc od czasu do czasu jeden z detektorów tyknie nawet wtedy, gdy żaden foton nie zostanie wysłany w kierunku układu doświadczalnego. Jeszcze częściej zdarzy się równoczesne tyknięcie dwóch detektorów, ponieważ każdy z nich zarejestruje pojawienie się jednego z tych wirtualnych fotonów. Gdy pojedynczy prawdziwy foton zostanie wstrzyknięty do układu, to podąży on tylko jedną ze ścieżek labiryntu, dotrze do jednego z detektorów i spowoduje jedno tyknięcie - pod warunkiem że będzie się zachowywać jak cząstka. Jeżeli będziemy strzelać w układ pojedynczymi fotonami, to wzrośnie liczba zarejestrowanych sygnałów, a zarazem pojawią się okazjonalne koincydencje wywołane przez fluktuacje próżni dające w jednym z detektorów sygnał przypadkowo zgrany w czasie z pojawieniem się „prawdziwego” fotonu w innym detektorze.

Ale to nie takie proste. Teoria kwantowa mówi, że w rzeczywistości istnieje splecenie (*entanglement*) między „rzeczywistymi” fotonami a tymi, które powstają z próżni. W jego rezultacie powstaje interferencja i - podobnie jak w eksperymencie z dwiema szczelinami - czasami dwie składowe dodają się konstruktywnie, a czasami się kasują. W zależności od właściwości padających na układ fotonów czasami liczba koincydencji będzie większa, czasami mniejsza, a czasami pozostanie nie zmieniona. W proponowanym przez zespół z Nowej Zelandii układzie czterech płytek światłodziących z pojedynczo wstrzeliwanymi fotonami jedna para detektorów powinna rejestrować dużą liczbę koincydencji, natomiast koincydencje rejestrowane przez drugą parę detektorów powinny odpowiadać zwykłym fluktuacjom próżni.

Byłoby to czysto kwantowe zjawisko, którego nie da się wyjaśnić ani w kategoriach falowych, ani korpuskularnych. Fakt, że pojedynczy foton pojawiający się w jednym z detektorów r ó w n o c z e ś n i e zmienia prawdopodobieństwo pojawienia się wirtualnego fotonu w drugim detektorze, daje wrażenie - gdy dwa detektory tykają naraz - jakby jeden foton pojawiał się w dwóch miejscach w tym samym momencie. Pierwotny foton jest rejestrowany tylko w jednym miejscu, ale jego obecność wpływa na to, co dzieje się w tej samej chwili gdzie indziej.

Wynik tego eksperymentu będzie interesujący niezależnie od tego, czy przewidywania Wallisa okażą się słuszne czy nie. Byłoby zaskakujące, gdyby rezultaty okazały się w jakiegokolwiek mierze sprzeczne z mechaniką kwantową. Jednak nawet gdy będą całkowicie zgodne, potwierdzą

istnienie fluktuacji próżni, które są wprawdzie znane od wielu lat, ale wciąż pozostają interesującym obiektem badań.

Coś za nic

Nie tylko fotony mogą pojawiać się jako wirtualne produkty kwantowych fluktuacji próżni. Zgodnie z kwantowymi regułami musi istnieć równowaga między nieokreślonością energii a nieokreślonością czasu. Energia potrzebna do wyprodukowania bardzo lekkiej cząstki (takiej jak foton, który ma wprawdzie zerową masę spoczynkową, ale niesie pewną ilość energii) może powstać z niczego i trwać przez względnie długi czas (tylko „względnie” długi - mamy tu do czynienia z małymi ułamkami sekundy), lecz energia potrzebna do stworzenia cięższych cząstek (takich jak para elektron-pozyton) może być „wypożyczona” od próżni na odpowiednio krótszy przedział czasu (po którym elektron i pozyton wzajemnie anihilują i oddają pożyczoną energię z powrotem). Próżnia, czyli nicość, z której powstają wszystkie te cząstki, jest w rzeczywistości kipiącym wirem aktywności, w którym rozmaite rodzaje cząstek nieustannie się pojawiają i giną.

Najbardziej skrajny przykład tego rodzaju koncepcji stanowi sugestia, wysuwana całkiem poważnie przez niektórych kosmologów, że cały wszechświat może być kwantową fluktuacją. Wszechświat ma już około 15 miliardów lat i zawiera całkiem sporo materii, więc na pierwszy rzut oka powyższa idea robi wrażenie dosyć trudnej do przyjęcia. Okazuje się jednak, że energia pola grawitacyjnego jest ujemna w takim samym sensie, w jakim energia związana z masą jest dodatnia. Jeżeli w wyniku kwantowej fluktuacji pojawił się mały bąbel energii, odpowiadający masie całego wszechświata, to energia jego pola grawitacyjnego mogła zrównoważyć energię jego masy. Teoria przewiduje, że w efekcie może powstać kwantowy wszechświat o zerowej masie całkowitej, dzięki czemu jego czas życia mógłby być bardzo długi. Końcowym etapem tworzenia wszechświata z niczego jest proces zwany inflacją, który w ułamku sekundy rozdyma to subatomowe ziarnko do rozmiarów piłki do koszykówki. Dalsza ekspansja postępuje w nieco spokojniejszym tempie.

Na razie nie będziemy się jednak zastanawiać nad tym, jak zrobić wszechświat z niczego. Chciałbym natomiast opowiedzieć o eksperymencie, w którym istnienie próżni zostało potwierdzone - przez wpływ, jaki wywiera ona na atomy sodu.

Próżni nie należy utożsamiać z nicością, lecz raczej myśleć o niej jako o superpozycji wielu różnych stanów pola elektromagnetycznego (należałoby także uwzględnić inne pola, ale na razie nie będziemy się tym zajmować). Te różne stany pola przypominają różne wysokości dźwięku, które można wydobyć z pojedynczej struny gitarowej. Podobnie jak poziomy energii elektronu w atomie, stany pola tworzą „drabinę” energii, a odstęp między szczeblami odpowiada energii jednego fotonu. Gdy atom emituje foton, energia tego pola zostaje zwiększona o jedną jednostkę odpowiadającą częstotliwości fali związanej z fotonem, a energia atomu zmniejsza się o dokładnie tyle samo. Chwilowe pojawienie się wirtualnego fotonu odpowiada samoczynnemu przesunięciu się pola próżni o jeden stopień w górę na drabinie energii, po czym powraca ono w dół - jest to proces przypominający cichutko grającą gitarę samoczynnie produkującą przypadkowe dźwięki.

Fluktuacje pola próżni w pobliżu przewodzącej powierzchni są nieco inne niż w otwartej przestrzeni, ponieważ pole elektryczne na powierzchni przewodnika musi być równe zeru. To eliminuje część wirtualnej aktywności próżni. Z punktu widzenia atomu poruszającego się równoległe do powierzchni przewodnika energia próżni jest nieco mniejsza w pobliżu powierzchni i coraz większa w miarę oddalania się od niej. W rezultacie powstaje skierowana do powierzchni siła i atom powinien być pchany (lub przyciągany, zależnie od punktu widzenia) w kierunku powierzchni przewodnika.

Sam pomysł powstał już w latach czterdziestych, ale efekt ten został zmierzony dopiero w 1993 roku przez Eda Hindsa i jego zespół z Yale University. Podobny efekt pojawia się, gdy dwie płaskie przewodzące płytki zostaną umieszczone w próżni bardzo blisko siebie. Zmiana fluktuacji pola próżni w obszarze między płytkami powoduje powstanie siły przyciągającej je do siebie. Jest to tak zwany efekt Casimira - od nazwiska holenderskiego fizyka, Hendrika Casimira - który został wielokrotnie zmierzony z użyciem rozmaitych materiałów przewodzących. Eksperyment z Yale jest jednak znacznie bardziej czuły i subtelny.

Badacze z Yale użyli dwóch szklanych płytek pokrytych warstwą złota, ustawionych pod niewielkim kątem do siebie w ten sposób, że tworzyły literę V. Odległość płytek w górnej części wynosiła zaledwie kilka tysięcznych milimetra. Wzdłuż płytek na różnych wysokościach posyłano atomy sodu. Odległości płytek na różnych wysokościach były znane z dokładnością do milionowych części milimetra dzięki pomiarom prążków powstających w wyniku interferencji monochromatycznego światła. Efekt wywierany na atomy przez zmodyfikowane pole próżni można wyliczyć z bardzo dużą dokładnością, a następnie porównać z zachowaniem atomów, które monitorowano za pomocą wiązek laserowych odbijających się od atomów, gdy wyłaniały się one po drugiej stronie litery V. Okazało się, że atomy zachowują się dokładnie tak, jak przewiduje teoria kwantowa, a nie tak, jak zachowywałyby się po przejściu przez klasyczny układ o tym samym kształcie i rozmiarach. A więc można zmierzyć wpływ „nicości” na pojedyncze atomy sodu.

Jestem pełen podziwu dla połączenia prostoty samej idei tego eksperymentu z precyzją, z jaką został on zrealizowany (a także dla faktu, że ponownie zatriumfowała teoria kwantowa). Upłynęło ponad czterdzieści lat od czasu, gdy teoretycy wysunęli tę ideę, zanim doświadczalnicy zdołali ją zrealizować, lecz warto było czekać. Na praktyczną realizację niektórych spośród dzisiejszych pomysłów teoretyków będziemy być może musieli czekać jeszcze dłużej, lecz doświadczenia te, jeżeli w ogóle zostaną wykonane, okażą się jeszcze bardziej spektakularne. Mimo wszystko trudno uwierzyć, aby teleportacja - dokładnie w stylu *Star Treka* - była możliwa, ale to właśnie między innymi przewiduje teoria kwantowa.

„Teleportuj mnie na pokład, Scotty”⁶⁵

Przypomnijmy sobie eksperyment myślowy EPR zrealizowany w praktyce przez Alaina Aspecta i jego kolegów. Pokazali oni, że pochodząca z jednego źródła para fotonów, o których wiemy, że mają ortogonalne polaryzacje (lecz nikt nie wie jakie), pozostaje w splecionym stanie nawet wtedy, gdy biegną one w przeciwne strony wszechświata. Gdy polaryzacja jednego z fotonów zostanie zmierzona, to drugi foton natychmiast redukuje się do stanu o przeciwnej polaryzacji. To splecenie oraz działanie na odległość stanowi klucz do techniki kwantowej teleportacji, zaproponowanej przez Charlesa Bennetta z Centrum Badawczego IBM w Yorktown Heights koło Nowego Jorku i opublikowanej w prestiżowym czasopiśmie „Physical Review Letters” w 1993 roku. Niezależnie od jej fantastycznonaukowego wydźwięku, autorzy tej pracy pokazali, jak rozwiązać problem, który wydawał się nie do rozwiązania na gruncie teorii kwantowej, i to za pomocą czysto kwantowych technik.

W klasycznym świecie przesyłanie kopii tekstów na dalekie odległości należy do codziennych zajęć wielu z nas. Oczywiście analogią teleportacji jest faks, który na dodatek ma tę zaletę, że pozostawia oryginał nienaruszony. Gazety, czasopisma i książki⁶⁶ są reprodukowane w nakładach sięgających setek tysięcy zasadniczo identycznych kopii, przynajmniej z punktu widzenia informacji, które zawierają. Na poziomie kwantowym kopiowanie okazuje się jednak nieco trudniejsze.

Po pierwsze, mamy tu kwestię, jak szczegółowo dany obiekt miałby być skopiowany. Zasada nieoznaczoności nie pozwala nam poznać wszystkich szczegółów wszystkich atomów, z których składa się, powiedzmy, kartka papieru, ani nawet dokładnych położeń wszystkich molekuł atramentu lub tuszu, za pomocą którego powstał tekst na papierze, więc wysyłana faksem kopia zawsze będzie jedynie przybliżeniem. Na dodatek, skanowanie kwantowego obiektu zmienia jego stan kwantowy - zgodnie z teorią kwantową sam fakt spoglądania na dany przedmiot zmienia stan tego przedmiotu. Zatem nawet gdybyśmy potrafili wykonać kopię kwantowego układu, to zniszczylibyśmy oryginał. W pewnym sensie bardziej przypomina to teleportację rodem z fantastyki niż faks, gdyż jeden z zasadniczych atrybutów teleportacji stanowi fakt, że oryginał jest niszczone, aczkolwiek istnieje wiele historii fantastycznonaukowych, w których rozważane są nieprzyjemne konsekwencje wykorzystania teleportacji do tworzenia dokładnych kopii istot ludzkich.

Klasyczna informacja może być wprawdzie kopiowana, ale szybkość jej transmisji jest ograniczona przez prędkość światła. Kwantowa informacja nie może być kopiowana („nie da się sklonować pojedynczego kwantu” - żartują fizycy), lecz czasami, jak w eksperymencie EPR, sprawia wrażenie, jakby przenosiła się ona natychmiast z miejsca na miejsce. Bennett i jego koledzy połączyli klasyczne i kwantowe aspekty układu, aby sformułować koncepcję maszyny teleportującej.

⁶⁵ W oryginale: „Beam me aboard, Scotty”. Jest to cytata z serialu *Star Trek* (por. przypis na stronie 8), w kulturze amerykańskiej będący synonimem teleportacji (przyp. tłum.).

⁶⁶ Przynajmniej niektóre książki, niekoniecznie ta!

Opisują oni technikę teleportacji za pomocą dwóch fikcyjnych osób, Adama i Beaty⁶⁷, którzy chcą przetransmitować (teleportować) jakiś obiekt. W tej wersji dla początkujących obiektem tym jest po prostu pojedyncza cząstka - na przykład elektron - w określonym stanie kwantowym. Beata i Adam dostają dwa pudełka, z których każde zawiera jedną z dwóch cząstek tworzących splecioną parę obiektów, czyli na przykład dwa fotony z eksperymentu EPR. Nie mierząc polaryzacji ani w inny sposób nie naruszając kwantowego stanu cząstek, Beata i Adam wyruszają w podróż w dwie różne strony wszechświata. Jakiś czas później - być może wiele lat później - Beata zechce wysłać Adamowi inną cząstkę. Jedyną rzecz, jaką musi w tym celu zrobić, to umożliwić oddziaływanie między tą cząstką i cząstką trzymaną w pudle, a następnie zbadać wynik tego oddziaływania. W rezultacie kwantowy stan cząstki w pudle zostaje ustalony (a zarazem zmieniony), co powoduje równoczesne ustalenie (i dostosowanie) stanu cząstki w pudle Adama.

Adam jeszcze nie wie, że Beata chce mu coś przekazać, gdyż znajduje się w innej części wszechświata. Beata musi wysłać mu wiadomość albo przez radio, albo umieszczając ogłoszenie w gazecie, którą Adam czytuje. Wiadomość ta zawiera informację o wyniku pomiaru dokonanego przez Beatę, a ponieważ wiadomość ta jest klasyczna, Beata może wysłać tyle kopii, ile zechce, umieszczając dowolną liczbę ogłoszeń w gazetach, radiu i gdzie tylko zapragnie. Wcześniej czy później wiadomość dotrze do Adama, który może teraz otworzyć swoje pudełko i wykorzystać informację uzyskaną od Beaty do wyeliminowania wpływu pierwotnego stanu jego własnej cząstki z jej obecnego stanu. Cząstka w pudełku Adama staje się dokładną kopią tej trzeciej, którą Beata chciała mu posłać, mimo że nie znała miejsca jego pobytu ani też nie porozumiewała się z nim bezpośrednio. Oryginalna wersja trzeciej cząstki została zniszczona (przeniesiona do innego stanu kwantowego) w momencie, gdy Beata wykonała swój pomiar. Adam ma pełne prawo uważać swoją cząstkę za jedyny egzemplarz pierwotnej cząstki, przekazanej mu przez Beatę za pomocą tej kombinacji klasycznej wiadomości i kwantowego działania na odległość.

Bennett podkreśla, że jego koncepcja nie stoi w sprzeczności z prawami fizyki. Umożliwia ona teleportację z prędkością mniejszą niż prędkość światła, gdyż Adam musi otrzymać „klasyczną” wiadomość od Beaty, aby prawidłowo odwikłać stan swojej cząstki. Jeżeli zrobi to wcześniej, to zmieni jej stan kwantowy i zniszczy jakąkolwiek możliwość prawidłowego odwikłania transmisji. „Wykonany przez Beatę pomiar zmusza drugą cząstkę EPR do zmiany, a klasyczna informacja uzyskana w wyniku tego pomiaru umożliwia komuś innemu stworzenie idealnej kopii danego obiektu”, ale „nie może się to odbyć w sposób natychmiastowy”⁶⁸. Jak powiedział pewien dowcipniś, jest to „teleportacja, ale nie taka, do jakiej jesteśmy przyzwyczajeni”. Biorąc pod uwagę pomysłowość eksperymentatorów, możemy się jednak spodziewać, że nie upłynie 40 lat, a będą oni teleportować elektrony z jednego końca laboratorium (a może i wszechświata) do drugiego, co będzie imponującą sztuczką nawet przy założeniu, że ewentualne praktyczne zastosowania mogą

⁶⁷ W oryginale: Alice i Bob, których inicjały są pierwszymi dwiema literami alfabetu. Bob jest zdrobnieniem od Roberta (przyp. tłum.).

⁶⁸ Cytat pochodzi z „Science News”, 10 kwietnia 1993.

się okazać kwestią bardzo dalekiej przyszłości. Pewne pokrewne badania tajemnic kwantowego świata mogą jednak znaleźć praktyczne zastosowania. Bogata wyobraźnia Bennetta nie ogranicza się do teleportacji. Jeden z jego wielu sukcesów, w oczywisty sposób ściśle związany z potrzebami firmy, dla której pracuje, wiąże się z konstrukcją niemożliwego do złamania szyfru za pomocą mechaniki kwantowej.

Kwantowa kryptografia

Istnieje oczywiście związek między kryptografią a teleportacją. Transmitowana cząstka zawiera informację, więc w zasadzie można wykorzystać teleportację do przekazywania tajnych wiadomości. Wyposażony w „splicioną” cząstkę szpieg może dokonać teleportacji innej cząstki do centrali, a następnie przesłać otwartym tekstem informację o wyniku pomiaru wykonanego w chwili, gdy nowa cząstka (niosąca wiadomość) oddziaływała ze splicioną. Każdy mógłby wprawdzie odczytać informację wysłaną otwartym tekstem, lecz bez drugiej cząstki splicionej informacja ta byłaby bezużyteczna.

Badania nad wykorzystaniem zjawisk kwantowych do przesyłania szyfrowanych wiadomości zaczęły się jeszcze przed pracami nad teleportacją, w latach osiemdziesiątych. Istnieje wiele proponowanych rozwiązań problemu, lecz wszystkie one zależą od systemów kodowania wykorzystujących tak zwany klucz złożony z szeregu przypadkowych cyfr.

Szyfry tego typu znane są miłośnikom historii szpiegowskich. Ludzie stosujący taki szyfr wyposażeni są w dwa identyczne zestawy przypadkowych liczb, tak zwane notesy, które w zasadzie mogą być grube jak książka telefoniczna. Osoba wysyłająca wiadomość przekształca ją w liczby (za pomocą dowolnego algorytmu, nawet tak prostego jak przypisanie liczby 1 literze A, liczby 2 literze B i tak dalej), a następnie wybiera jedną stronę z notesu, wpisuje kolejne liczby z notesu pod liczbami odpowiadającymi literom tekstu i dodaje je do siebie. Zakodowana w ten sposób wiadomość zostaje wysłana wraz z informacją o tym, która strona z notesu została użyta do kodowania, a strona odbierająca wiadomość dekoduje ją za pomocą swojej kopii notesu. Szyfr tego typu - zwany szyfrem Vernama, od nazwiska Amerykanina, Gilberta Vernama, który stworzył go w czasie pierwszej wojny światowej - jest często określany jako technika jednorazowego notesu, ponieważ korzystający z niej szpiedzy dysponowali całą książką liczb, z której wrywali kolejne kartki i niszczyli je natychmiast po użyciu (jeżeli do kodowania wykorzystano się wielokrotnie tę samą stronę notesu, to w przesyłanych układach liczb pojawiają się regularności, które umożliwiają złamanie szyfru).

Tego typu szyfru nie da się złamać, chyba że osoba, która przechwytuje przesyłane wiadomości, ma także kopię notesu. Kłopot polega na tym, że szpiedzy działają zwykle w warunkach, w których zawsze istnieje szansa, iż przeciwnik zdobędzie notes, lub, co gorsza, potajemnie sporządzi jego kopię i tym samym złamie szyfr bez wiedzy zainteresowanych stron.

Fizyka kwantowa oferuje rozwiązanie obu tych problemów. Po pierwsze, nie ma potrzeby ukrywania zaszyfrowanych wiadomości, ponieważ, dokładnie tak jak klasyczna wiadomość od Beaty do Adama, są one bezużyteczne dla kogoś, kto nie posiada informacji przesyłanej kanałem

kwantowym, czyli w tym wypadku - klucza. Zatem wszystko, co jest potrzebne, to metoda przesłania samego klucza - czyli ciągu liczb - w taki sposób, aby nikt inny oprócz Beaty i Adama nie mógł go odczytać. Dla maksymalnego uproszczenia problemu klucz jest zapisany w notacji binarnej, jako ciąg zer i jedynek, podobnie jak informacja w komputerze. Można go wysłać za pomocą dwustanowego (tak/nie) układu sygnalizacyjnego.

Bennett i jego współpracownicy pokazali, że można to zrobić, używając spolaryzowanego światła. Ich technika polega na wysyłaniu przez Beatę strumienia fotonów spolaryzowanych równolegle lub prostopadle do jednego z dwóch z góry ustalonych kierunków polaryzacji (ustawionych pod kątem 45 stopni względem siebie). Polaryzacja każdego z fotonów jest przypadkowa. Adam mierzy polaryzację przybywających do niego fotonów, ale w każdym pomiarze może on ustawić swój detektor w jednym z dwóch uzgodnionych kierunków. Także i ten wybór dokonywany jest przypadkowo. W każdym wypadku Adam uzyska „odповідź” równoważną albo równoległej (cyfra jeden), albo prostopadłej (cyfra zero) polaryzacji fotonu względem swojego detektora. Następnie Adam informuje Beatę, jaka była orientacja detektora przy kolejnych pomiarach, a Beata z kolei mówi mu, w których wypadkach ustawienie detektora było zgodne z polaryzacją wysyłanego fotonu (ta informacja może zostać przekazana przez zwykły telefon). Następnie Beata i Adam odrzucają wszystkie pomiary, w których Adam wybrał złe ustawienie detektora, a pozostały ciąg liczb mogą wykorzystać jako bezpieczny klucz do binarnego szyfrowania. Z pozoru wygląda to na dosyć uciążliwy proceder, lecz w praktyce można tego uniknąć, przepuszczając wszystko przez komputer, który wykona za nas tę żmudną robotę.

Piękno tej techniki polega na tym, że jedyny sposób na złamanie szyfru przez osoby trzecie wymaga podsłuchiwanie kwantowego kanału komunikacyjnego i zmierzenia polaryzacji fotonów w trakcie ich przesyłania od Beaty do Adama. Wiemy jednak, że akt pomiaru polaryzacji zmienia polaryzację! Nawet jeżeli podsłuchiwacz skopiuje zmierzony przez siebie foton i pośle go dalej w kierunku Adama, nie zdoła w ten sposób odtworzyć oryginalnego stanu kwantowego fotonu. Beata i Adam mogą wykryć tę interferencję za pomocą standardowej techniki polegającej na porównywaniu co piątej (lub co siódmej, lub innego dowolnie wybranego podzbioru) cyfry klucza, nie ujawniając reszty.

Pomysł wygląda na naciągany i mało realny, lecz Bennett i jego koledzy rzeczywiście skonstruowali działający układ. Wprawdzie ich prototyp wysyła zakodowane wiadomości na odległość zaledwie 30 cm, lecz dzieje się tak tylko dlatego, że został zmontowany na stole w laboratorium. Spolaryzowane fotony w zasadzie można posyłać na odległość wielu kilometrów za pomocą światłowodów. Bądź co bądź, gdy John Logie Baird skonstruował pierwszy nadajnik telewizyjny, to odbiornik znajdował się w odległości zaledwie kilku metrów.

Kryptografowie kwantowi nie ustają w wysiłkach, wymyślając coraz lepsze metody przesyłania kluczy. Artur Ekert⁶⁹ z Uniwersytetu w Oksfordzie (współpracował także z Bennettem) pokazał, w

⁶⁹ Absolwent fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego (przyp. tłum.).

jaki sposób wymagany ciąg przypadkowych cyfr można uzyskać za pomocą zmodyfikowanego eksperymentu EPR. W tej wersji doświadczenia EPR fotony zostają wysłane ze wspólnego źródła w przeciwnych kierunkach, jedna wiązka w kierunku Beaty, druga w kierunku Adama. Każde z nich mierzy polaryzację fotonów za pomocą detektorów ustawionych wzdłuż jednego z dwóch umówionych kierunków polaryzacji. Tak jak poprzednio, wybór jednego z dwóch kierunków odbywa się w sposób losowy. Następnie Beata i Adam porównują wybrane przez siebie kierunki polaryzacji. Mogą w tym celu skorzystać z telefonu - ta informacja nie musi być tajna, gdyż nie ujawniają oni samych wyników, a jedynie ustawienia detektorów. Na koniec, po odrzuceniu pomiarów, w których ustawienia detektorów były różne, otrzymują ciąg cyfr odpowiadający wynikom pozostałych pomiarów - oczywiście z uwzględnieniem faktu, że każda para fotonów EPR ma przeciwne polaryzacje, więc wtedy gdy Beata uzyska cyfrę jeden, to Adam dostanie cyfrę zero i *vice versa*. Również i w tym wypadku każda próba podsłuchu kwantowego kanału komunikacyjnego przez podglądanie fotonów, zanim dotrą one do Beaty i Adama, spowoduje zaburzenie ich polaryzacji w wykrywalny sposób.

Jak widać z tych przykładów, kwantowe właściwości fotonów znajdują praktyczne zastosowania. Na razie nie są to wprawdzie powszechnie dostępne kwantowe maszyny szyfrujące lub teleportujące, lecz istnieją już działające laboratoryjne prototypy. Nie ma chyba wątpliwości co do faktu, że same fotony istnieją, wraz ze swoją dualną, falowo-korpuskularną naturą. Podczas gdy jedni eksperymenci starają się wykorzystać nawet najbardziej dziwaczne właściwości kwantów w praktyce, inni próbują popsuć ten prosty obraz cząstkowej natury kwantu światła, sięgając „do środka” fotonu. Za sprawą kwantowej nieokreśloności morze wirtualnych cząstek musi przecież sięgać nawet do wnętrza fotonu. Foton ma więcej energii niż sama próżnia. Skoro próżnia jest pełna wirtualnych cząstek, to dlaczego miałyby ich nie być wewnątrz fotonu?

Wnętrze fotonu

Do tej pory traktowaliśmy fotony jako proste obiekty oddziałujące z innymi cząstkami poprzez efekty elektromagnetyczne. Dlaczego miałyby być inaczej, skoro fotony „składają się” z elektromagnetyzmu? Jednak oprócz grawitacji (która jest bardzo słabą siłą i może być w zasadzie pominięta w oddziaływaniach subatomowych cząstek) i samego elektromagnetyzmu w przyrodzie istnieją jeszcze dwie inne siły i obie działają na poziomie subatomowym. Tak zwane słabe oddziaływanie jądrowe jest odpowiedzialne za zjawiska związane z radioaktywnością i rozpadami jądrowymi, natomiast silne oddziaływanie jądrowe wiąże ze sobą cząstki, z których składa się jądro atomowe (protony i neutrony). Protony i neutrony są z kolei zbudowane z jeszcze bardziej podstawowych cząstek zwanych kwarkami i właśnie na poziomie kwarków zachodzi oddziaływanie silne. Podział ról robi wrażenie logicznego i klarownego, jednak wyniki niektórych eksperymentów sugerują, że także fotony odczuwają efekt oddziaływania silnego - jakby „czuły” kwarki wewnątrz protonu, a nie tylko jego ładunek elektryczny.

Te dręczące podejrzenia, że istnieje jakiś dodatkowy poziom aktywności związany z fotonami, zachęciły naukowców z centrum badawczego DESY koło Hamburga do przeprowadzenia - w

początkach lat dziewięćdziesiątych - eksperymentów, które wykazały, że fotony rzeczywiście zachowują się tak, jakby były złożonymi obiektami, zbudowanymi z mieszaniny kwarków, elektronów i innych cząstek.

Wyjaśnienie tego zjawiska jest dokładnie takie samo jak w przypadku kwantowej natury próżni. Nieokreśloność energii fotonu pozwala mu na krótką chwilę zamienić się w parę kwark-antykwar (albo elektron-pozyton, albo coś innego), podobnie jak nieokreśloność zerowego poziomu energii próżni pozwala na pojawianie się par elektron-pozyton (albo kwark-antykwar, albo innych cząstek). Jeżeli foton zderza się z protonem w momencie, gdy znajduje się w jednym z tych chwilowych wirtualnych stanów, to kwarki wewnątrz fotonu będą oddziaływać bezpośrednio z kwarkami wewnątrz protonu i w rezultacie powstanie kaskada innych cząstek, których obecność można wykryć za pomocą standardowych instrumentów.

Są to nowe odkrycia, których konsekwencje pozostają nadal przedmiotem dociekań i które z pewnością jeszcze przez wiele lat będą intensywnie weryfikowane eksperymentalnie. Zasadniczy wniosek jest jednak jasny. Przyjeliśmy już do wiadomości falowo-korpuskularną naturę światła. Teraz musimy także oswoić się z faktem, że światło może zamienić się w materię, a następnie z powrotem w światło. Odbywa się to w skali czasowej odpowiadającej czasowi Plancka, równemu 10^{-43} sekundy.

Niezależnie od swojej tajemniczej i niezwykłej natury zjawiska te utwierdzają nas w przekonaniu, że oprócz innych symetrii kwantowego świata - które tak silnie kształtują jego naturę - istnieje także symetria między światłem a materią. Spotkaliśmy już przecież atomy, które w pewnych okolicznościach podążają „dwoma drogami równocześnie” przez układ będący odpowiednikiem eksperymentu z dwiema szczelinami, a następnie interferują w sposób, jakiego moglibyśmy się spodziewać raczej po falach. Powinniśmy więc pogodzić się z rzeczywistością i pozwolić „falom” światła, aby zachowywały się nie tylko jak jakiś specjalny gatunek cząstek - fotony - lecz także jak cząstki, z których zbudowane są atomy.

W jaki sposób zachowują się jednak cząstki materii, łącznie z atomami? Wiemy już, że w pewnym sensie nie istnieją one jako cząstki. Gdy nikt na nie nie patrzy, gdy żaden eksperyment nie mierzy ich położenia ani innych właściwości, kwantowe obiekty istnieją jako superpozycja stanów dopóty, dopóki jakiś zewnętrzny czynnik nie spowoduje redukcji ich probabilistycznej funkcji falowej. Co stałoby się, gdybyśmy przez cały czas patrzyli na cząstkę? W tej współczesnej wersji słynnego paradoksu, wymyślonego w piątym wieku przed naszą erą przez greckiego filozofa, Zenona z Elei, obserwowany atom nie może zmienić swojego kwantowego stanu, dopóki nie przestaniemy patrzeć. Nawet jeżeli przygotowuje się atom w jakimś niestabilnym, wysoko wzbudzonym stanie (jak atomy, których użyto do produkcji pojedynczych fotonów w eksperymentach opisanych wcześniej, w pierwszej części tego rozdziału), to pozostanie on w tym stanie - chybocząc się na krawędzi, lecz niezdolny do skoku w dół na bardziej stabilny poziom energii - tak długo, jak długo będzie obserwowany. Idea tego „kwantowego efektu Zenona” powstała pod koniec lat siedemdziesiątych jako naturalna konsekwencja koncepcji, że obiekt

kwantowy nie istnieje jako cząstka, jeżeli nie jest obserwowany. Tak mówi teoria: obserwując kwantowy czajnik, nie pozwalamy mu się zagotować. Potwierdzają to eksperymenty wykonane w początkach lat dziewięćdziesiątych.

Obserwując kwantowy czajnik

Zenon z Elei wykazał, za pomocą wielu paradoksów, że nasze potoczne wyobrażenia na temat czasu i ruchu muszą być błędne jako sprzeczne z logiką. W jednym z przykładów Zenon analizuje ruch strzały wystrzelonej w kierunku uciekającego jelenia. Strzała nie może być równocześnie w dwóch miejscach, zatem w każdym momencie czasu musi znajdować się w jakimś określonym miejscu w powietrzu między łucznikiem a jeleniem. Jeżeli strzała znajduje się w określonym, pojedynczym miejscu w przestrzeni, to znaczy, że jest ona nieruchoma. Jeżeli strzała się nie porusza, to nigdy nie dotrze do jelenia.

Nie ma wątpliwości, przynajmniej wśród jeleni i myśliwych, że wniosek Zenona jest błędny. Zenon oczywiście wiedział o tym, a zasadniczą treść jego „paradoksu” stanowi pytanie, **d l a c z e g o** wniosek jest błędny. Zagadkę tę można rozwiązać, stosując rachunek różniczkowy, który opisuje nie tylko samo położenie, lecz także zmianę położenia strzały w określonym momencie czasu. Na poziomie kwantowym okazuje się, że ani położenie, ani prędkość strzały nie mogą być określone z absolutną dokładnością w żadnym momencie (a nawet, że nie istnieje coś takiego jak określony moment w czasie, gdyż czas też podlega regułom nieokreśloności), co osłabia argumentację Zenona i pozwala na dalszy ruch strzały. Okazuje się jednak, że istnieje kwantowy odpowiednik paradoksu Zenona, aczkolwiek zamiast strzały i jelenia występuje w nim „komórka” zawierająca kilka tysięcy jonów berylu.

Jon to atom pozbawiony jednego lub więcej elektronów. A więc jon ma dodatni ładunek elektryczny, co pozwala manipulować jonami za pomocą pól elektrycznych i łapać je w swego rodzaju elektryczną pułapkę jonową - kwantowy czajnik. Badacze z National Institute of Standards and Technology (NIST) [Narodowego Instytutu Standardów i Technologii] w Boulder w Kolorado znaleźli sposób na to, żeby zagotować jony berylu w czajniku, a następnie - patrząc na czajnik - zatrzymać gotowanie.

Na początku eksperymentu wszystkie jony znajdowały się w tym samym stanie kwantowym, który będziemy (w ślad za zespołem z Boulder) nazywać poziomem 1. Przepuszczając przez komórkę wiązkę fal o określonej częstotliwości przez okres dokładnie 256 milisekund, eksperymentatorzy zdołali przenieść wszystkie jony do wyższego poziomu, zwanego poziomem 2. Jest to odpowiednik gotujących się w czajniku jonów. W jaki sposób i w którym momencie jony faktycznie dokonują przejścia z jednego stanu kwantowego do innego? Pamiętamy, że decydują się one na jeden określony stan kwantowy tylko wtedy, gdy wykonywany jest pomiar tego stanu - gdy na nie ktoś popatrzy. Teoria kwantowa mówi, że przejście ze stanu do stanu nie jest zjawiskiem typu tak/nie. W tym konkretnym eksperymencie czas 256 milisekund został wybrany dlatego, że dla tego konkretnego jonu jest to czas, po którym pojedynczy jon dokona przejścia do poziomu 2 z niemal 100% prawdopodobieństwem. Inne układy kwantowe mają inne

charakterystyki czasowe (podobnym zjawiskiem jest czas połowicznego rozpadu jąder atomów radioaktywnych), lecz ogólny wzorzec zachowania pozostaje niezmienny. W tym konkretnym wypadku, po 128 milisekundach (czas „połowicznego zaniku” tego przejścia⁷⁰) jest jednakowo prawdopodobne, że pojedynczy jon dokonał przejścia, jak również, że nadal pozostaje na poziomie 1. Jon znajduje się w superpozycji stanów. Prawdopodobieństwo stopniowo się zmienia w czasie 256 milisekund, od 100% dla poziomu 1 do 100% dla poziomu 2, a w każdym pośrednim momencie jon znajduje się w pewnej superpozycji stanów z odpowiednią proporcją prawdopodobieństw. Jeżeli jednak układ kwantowy jest obserwowany, to musi znajdować się w jednym określonym stanie - nie da się „zobaczyć” mieszaniny stanów.

Teoria kwantowa mówi, że gdybyśmy mogli popatrzeć na jony w momencie, gdy upłynie połowa z tych 256 milisekund, to zostałyby one zmuszone do wyboru jednego z dwóch możliwych stanów, podobnie jak kot Schrödingera musi „zdecydować się”, czy jest żywy czy martwy, w momencie, gdy zajrzemy do pudła. W sytuacji równych prawdopodobieństw połowa jonów poszłaby w jedną stronę, a połowa w drugą. W odróżnieniu od eksperymentu z kotem Schrödingera hipoteza kwantowego czajnika została zweryfikowana doświadczalnie, dokładnie tak, jak życzyłby sobie Newton.

Zespół z NIST stworzył ciekawą technikę pozwalającą patrzeć na jony w czasie, gdy zastanawiają się one nad swoim stanem. Dokonano tego, strzelając w kwantowy czajnik bardzo krótkim impulsem laserowym. Energia wiązki laserowej została tak dopasowana do energii jonów, aby te jony, które znajdowały się na poziomie 2, pozostały nienaruszone, natomiast te z nich, które wiązka laserowa zastała na poziomie 1, zostały przeniesione do jeszcze wyższego poziomu (numer 3), z którego niemal natychmiast (po mniej więcej milisekundzie) spadły z powrotem do poziomu 1. W wyniku przejścia z poziomu 3 na poziom 1 każdy jon wyemitował foton o określonej częstotliwości. Mierząc liczbę wyemitowanych fotonów, badacze mogli stwierdzić, ile jonów znajdowało się na poziomie 1 w chwili, gdy wiązka lasera trafiła w czajnik.

Gdy impuls lasera „popatrzył” na jony po 128 milisekundach, to oczywiście połowa z nich znajdowała się na poziomie 1. Gdy jednak eksperymentatorzy „rzucili okiem” (laserowym) na jony nie raz, ale cztery razy w jednakowych odstępach w ciągu 256 milisekund, to na końcu dwie trzecie jonów nadal pozostawało na poziomie 1. A gdy popatrzyli 64 razy (co 4 milisekundy), niemal wszystkie jony były nadal na poziomie 1. Chociaż fale radiowe robiły, co mogły, aby podgrzać jony, nie zdołały zagotować kwantowego czajnika.

Przyczyna tego stanu rzeczy jest następująca. Po upływie pierwszych 4 milisekund prawdopodobieństwo, że pojedynczy jon przeskoczy do poziomu 2, wynosi zaledwie 0,01%. Fala prawdopodobieństwa związana z jonem zaczęła się już wprawdzie rozprzestrzeniać, ale nadal jest ona silnie skoncentrowana wokół stanu kwantowego odpowiadającego poziomowi 1. Zatem podglądający jony laser stwierdzi, że 99,99% jonów znajduje się nadal na poziomie 1. Nie jest to

⁷⁰ Analogia z rozpadem radioaktywnym nie jest dokładna, gdyż w naszym przypadku przejście atomowe jest „pompowane” z zewnątrz przez fale radiowe, dzięki czemu po 256 milisekundach wszystkie atomy dokonają przejścia.

jednak jedyny rezultat działania lasera. Sam fakt „podglądania” jonu zmusza go do wyboru określonego stanu kwantowego, więc jon wraca (redukuje się) do poziomu 1. Kwantowa fala prawdopodobieństwa zaczyna się ponownie rozmywać, ale po następnych 4 milisekundach laser ponownie podgląda jony, wymuszając powtórny redukcję fali do poziomu 1. W rezultacie fala nigdy nie będzie miała szansy znacznie się rozprzestrzenić, gdyż każdy kolejny błysk lasera zmusi ją do powrotu. Po upływie pełnych 256 milisekund jony nadal znajdują się na poziomie 1, gdyż - będąc stale pod obserwacją - nie miały możliwości przejścia na poziom 2.

W opisaney powyżej wersji eksperymentu istnieje wciąż niewielka szansa na to, że któryś jon dokona przejścia na poziom 2 w czasie 4 milisekund przerwy pomiędzy dwoma kolejnymi błyskami lasera. Jednak tylko jeden jon na 10 000 zdoła tego dokonać. Doskonała zgodność rezultatów eksperymentu badaczy z NIST z przewidywaniami teorii kwantowej sugeruje, że gdybyśmy potrafili monitorować jony w sposób ciągły, to żaden z nich nie zdołałby nigdy dokonać przejścia. Jeżeli świat istnieje dlatego, że jest obserwowany, jak sugeruje teoria kwantowa⁷¹, to prawdą jest także, iż świat zmienia się dzięki temu, że nie jest nieustannie obserwowany.

Powyższa kwestia ma interesujące reperkusje dla tradycyjnego zagadnienia filozoficznego, czy drzewo istnieje także wtedy, gdy nikt na nie nie patrzy. Jednym z argumentów na korzyść nieprzerwanego istnienia drzewa było stwierdzenie, że nawet gdy żaden ludzki obserwator nie patrzy na drzewo, to Bóg nadal pełni straż. W świetle wyników eksperymentu z NIST, można by stwierdzić, że nawet Bóg musi od czasu do czasu (w skali Plancka) mrugać oczami, aby pozwolić drzewu rosnąć i rozwijać się.

Obserwując nieustannie jony, możemy „zamrozić” je w określonym stanie kwantowym. Dzięki badaczom z należącego do IBM Centrum Badawczego Almaden w San Jose w Kalifornii możemy także „zobaczyć” fale prawdopodobieństwa, które decydują o zachowaniu elektronów.

Wielki elektronowy spęd

Jednym z najciekawszych przykładów działania fal elektronowych jest urządzenie wynalezione w latach pięćdziesiątych w Tybindze, zwane interferometrem elektronowym, którego ulepszoną wersję skonstruował w latach dziewięćdziesiątych zespół Franka Hasselbacha, także z Tybingi.

Jest to elektronowa wersja doświadczenia z dwiema szczelinami. Wiązka elektronów biegnie w kierunku naładowanego ujemnym ładunkiem elektrycznym drutu. Druć odpycha elektrony, a cały układ jest tak skonstruowany, że elektron ma jednakową szansę na przejście po obu stronach drutu. W rezultacie wiązka elektronów rozdziela się na dwie. Nieco dalej znajduje się drugi drut, naładowany przyciągającym elektrony dodatnim ładunkiem, który powoduje, że obie wiązki elektronów łączą się ponownie w jedną. Na samym końcu znajduje się detektor, który, podobnie jak w doświadczeniu z dwiema szczelinami, rejestruje nadlatujące elektrony.

Gdy elektrony biegną pojedynczo przez cały układ, na ekranie detektora powstaje obraz interferencyjny, tak jakby każdy elektron rozdzielał się na dwa przy przejściu w pobliżu pierwszego

⁷¹ Raczej nie teoria kwantowa, lecz John Wheeler (przyp. tłum.).

drutu, a następnie obie połówki łączyły się po minięciu drugiego drutu i interferowały ze sobą. (Jestem pewien, że czytelnik nie jest zaskoczony takim stanem rzeczy. Byłoby zapewne bardziej zaskakujące, gdybym teraz oznajmił, że elektrony n i e zachowują się w ten sposób). Jak dotąd, jest to tylko jeszcze jedna wersja eksperymentu z dwiema szczelinami, aczkolwiek dosyć wyrafinowana. W 1992 roku zespół z Tybingi wprowadził jeszcze jedną modyfikację.

W tej wersji eksperymentu do interferometru elektronowego dołączono urządzenie zwane filtrem Wiena. Filtr ten jest zbudowany z pary elektrycznie naładowanych płaskich płytek oddzielonych małą przerwą (w gruncie rzeczy jest to płaski kondensator). Dodatkowo płytki umieszczone są w polu magnetycznym ustawionym równoległe do ich płaszczyzn. Obdarzone ładunkiem elektrycznym cząstki, na przykład elektrony, które poruszają się w obszarze filtra, „czują” zarówno pole elektryczne, jak i magnetyczne. Pola te są dobrane w ten sposób, że cząstki poruszające się z pewną określoną prędkością przejdą przez filtr bez zmiany kierunku, a pozostałe zostaną nieznacznie odchylone. Badacze z Tybingi naruszyli symetrię oryginalnego eksperymentu z interferometrem, ustawiając filtr Wiena między dwoma drutami w taki sposób, że jedna połowa „rozszczonego” elektronu doznaje odchylenia, a druga połowa przechodzi bez przeszkód. W rezultacie połowa fali elektronowej porusza się przez interferometr szybciej, wypadając z rytmu. Obraz interferencyjny, który powstaje na ekranie, jest teraz inny niż w wersji bez filtra - lecz dokładnie taki, jak przewiduje teoria kwantowa, nawet gdy elektrony biegną pojedynczo. Jest to jeszcze jeden dowód na to, że elektrony zachowują się jak fale, aczkolwiek nie jest to jeszcze to samo, co „zobaczenie” samych fal. Ta sztuczka udała się dopiero w 1993 roku, gdy badacze z IBM przeprowadzili pierwszy spęd do kwantowej zagrody.

Niezależnie od swoich aspektów poznawczych eksperyment ten ma istotne zastosowania praktyczne, gdyż związana z nim technika manipulowania i ustawiania na powierzchni pojedynczych atomów - tak zwana nanotechnologia - może niebawem umożliwić konstrukcję mniejszych, szybszych i wydajniejszych komputerów, a także wielu innych submikroskopowych urządzeń, które, zdaniem niektórych naukowców, doprowadzą do nowej rewolucji przemysłowej. Badacze z IBM użyli urządzenia zwanego skanującym mikroskopem tunelowym⁷², za pomocą którego ułożyli na płaskiej miedzianej powierzchni 48 atomów żelaza, tworzących idealny okrąg o średnicy zaledwie 14 miliardowych części metra⁷³. To była ich „kwantowa zagroda”. Dla elektronu znajdującego się wewnątrz zbudowanego z atomów żelaza okręgu stanowi on nieprzebytą ścianę. Zgodnie z teorią kwantową fale elektronowe wewnątrz okręgu będą odbijać się od ścian i utworzą falę stojącą - jak szereg zmarszczek na wodzie zamrożonych w czasie lub jak struna gitarowa wydająca nieustannie ten sam dźwięk.

Tyle teoria. Gęstość elektronów w dowolnym miejscu wewnątrz kwantowej zagrody można zmierzyć, również za pomocą STM, a następnie przekształcić wyniki tego pomiaru w obraz tego,

⁷² Ang: *scanning tunnelling microscope*, STM (przyp. tłum.).

⁷³ Miliardowa część metra nosi nazwę nanometra. Przedrostek „nano” pochodzi od greckiego słowa *nanos*, oznaczającego karła, stąd określenie „nanotechnologia”.

co widzielibyśmy, gdyby nasze oczy mogły bezpośrednio widzieć elektrony. Obraz - elektronowa fala stojąca - wygląda dokładnie tak jak fotografia zmarszczek na jeziorze otaczających miejsce, w które wrzucono kamień.

Elektrony zachowują się jak fale. Nawet atomy, jak się przekonaliśmy w prologu, mogą zachowywać się jak fale w jednej z wersji doświadczenia z dwiema szczelinami. Warto w tym miejscu zwrócić uwagę, że Hans Dehmelt z University of Washington w Seattle zdobył w 1989 roku Nagrodę Nobla za pionierskie, zakończone sukcesem próby schwywania zarówno pojedynczych elektronów, jak i pojedynczych atomów w magnetyczne „pudełko” (podobne do „kwantowego czajnika” użytego w doświadczeniu nad paradoksem Zenona), a następnie obserwowania korpuskularnych aspektów ich zachowania. Nie da się „zobaczyć” złapanego w ten sposób pojedynczego elektronu, lecz w latach osiemdziesiątych Dehmelt i jego współpracownicy nie tylko zdołali złapać pojedynczy atom baru w jedną z tak zwanych pułapek Paula⁷⁴, lecz także sfotografowali go w emitowanym przez sam atom niebieskim świetle. Na fotografii atom widoczny jest jako maleńka niebieska kropka na czarnym tle. Jeżeli zgodzimy się, że oglądanie fotografii jest równie dobre jak oglądanie gołym okiem (a tylko dzięki fotografii wiemy, jak wygląda wiele odległych galaktyk i innych obiektów we wszechświecie), to można zobaczyć pojedynczy atom.

Mimo wszystko filozofowie i kwantowi interpretatorzy mogą nadal rozważać kwestię, czy atom istnieje, gdy nikt go nie fotografuje. Poznaliśmy już jednak sporo dowodów na słuszność teorii kwantowej, a zarazem przykładów zadziwiających właściwości obiektów kwantowych. Nadszedł czas na obiecane wyjaśnienie, o co naprawdę chodzi w kwantowej rzeczywistości. Zanim jednak pograżymy się w rozmaitych propozycjach interpretacji kwantowej rzeczywistości - z których większość robi na laiku wrażenie rozpaczliwych prób wyjaśnienia niewyjaśnialnego - być może powinienem najpierw sprecyzować, co właściwie próbujemy wytłumaczyć, za pomocą dwóch ostatnich przykładów dziwnego zachowania samego światła.

Kiedy foton jest?

Jednym z interesujących aspektów rozwoju teorii kwantowej w ciągu ostatnich kilku lat jest fakt, że pewne pomysły, które pierwotnie powstały jako „eksperymenty myślowe”, bez perspektyw praktycznej realizacji, zostały w końcu jednak zrealizowane, „naocznie” ukazując dziwną naturę kwantowego świata. Klasycznym przykładem jest oczywiście eksperyment EPR, koncepcyjnie przeformułowany i zaadaptowany przez Johna Bella, a następnie zrealizowany przez zespół Alaina Aspecta. Upiękniało pół wieku, zanim myślowy eksperyment EPR się zmaterializował. W innych wypadkach postęp był niekiedy znacznie szybszy.

John Wheeler, promotor pracy doktorskiej Richarda Feynmana, wpadł na wyjątkowo sprytny pomysł pod koniec lat siedemdziesiątych, gdy pracował na University of Austin w Teksasie.

⁷⁴ Twórcy pułapek jonowych, Wolfgang Paul i Hans Dehmelt, podzielili się w 1989 roku Nagrodą Nobla z Normanem Ramseyem nagrodzonym za odkrycia, które umożliwiły między innymi budowę precyzyjnych zegarów atomowych (przyp. tłum.).

Wspomniałem mimochodem o tym „eksperymentcie z opóźnionym wyborem” w książce *W poszukiwaniu kota Schrödingera*, nie zdając sobie sprawy, że zostanie on zrealizowany kilka lat po jej opublikowaniu. Opisałem także kosmiczną (dosłownie) wersję „myślowego eksperymentu z opóźnionym wyborem”, w której wykorzystane byłoby światło odległych kwazarów. W połowie lat osiemdziesiątych nikt nie przypuszczał, że wersja ta może rzeczywiście zostać zrealizowana, lecz w połowie lat dziewięćdziesiątych okazało się, że pomiary światła kwazarów, które zaledwie dwadzieścia lat wcześniej Wheeler rozważał wyłącznie w kategoriach eksperymentu myślowego, mogą niebawem zostać wykonane.

Eksperyment z opóźnionym wyborem jest odmianą doświadczenia z dwiema szczelinami. Wiemy, że fotony tworzą wzór interferencyjny na ekranie nawet wtedy, gdy posyłane są przez układ pojedynczo, sprawiając wrażenie, że każdy z nich podąża dwiema drogami równocześnie, a następnie interferuje sam ze sobą. Wiemy także, iż jeżeli wstawimy do układu system monitorujący, dzięki któremu możemy uzyskać informację o przejściu fotonu przez jedną z dwu szczelin, to zobaczymy pojedyncze fotony przechodzące przez pojedynczą szczelinę - a na ekranie nie pojawi się wzór interferencyjny. Zachowanie fotonów przy przejściu przez szczeliny zależy od tego, czy i w jaki sposób na nie patrzymy.

Wheeler zwrócił uwagę, że w zasadzie powinno być możliwe umieszczenie urządzenia monitorującego przejście elektronów w pośrednim położeniu - między przesłoną ze szczelinami a ekranem. Moglibyśmy dzięki temu sprawdzać, czy foton zachowuje się jak cząstka czy jak fala po przejściu fotonu przez szczeliny, ale przed dotarciem do ekranu. Teoria kwantowa mówi, że wykrycie fotonu w jednym z dwóch kanałów powoduje redukcję funkcji falowej całego układu doświadczalnego, w wyniku czego nie powstanie obraz interferencyjny na ekranie. Jeżeli jednak zdecydujemy się nie patrzeć i wyłączymy detektor po przejściu fotonu przez szczeliny (ale przed jego dotarciem do detektora), to odzyskamy wzór interferencyjny. Tym samym zachowanie światła przy przejściu przez szczeliny zostaje zdeterminowane po jego przejściu przez szczeliny. Co więcej - jak mówi Wheeler - możemy podjąć decyzję o wyłączeniu lub włączeniu detektora dopiero po przejściu światła przez szczeliny. Stąd bierze się nazwa „eksperymentu z opóźnionym wyborem”.

Podobnie jak historia kota Schrödingera myślowy eksperyment z opóźnionym wyborem obnaża absurdalną naturę mechaniki kwantowej. Jednak w odróżnieniu od kota Schrödingera doświadczenie z opóźnionym wyborem zostało zrealizowane w połowie lat osiemdziesiątych przez dwie niezależne grupy, jedną z University of Maryland, a drugą z uniwersytetu w Monachium. W obu wypadkach użyte zostało światło laserowe rozszczepiane na dwie wiązki przez lustrzaną płytkę światłodzielną. Jedną z wiązek przepuszczano następnie przez urządzenie zwane przesuwnikiem fazy, które powoduje, że wiązka ta „maszeruje” w nieco innym rytmie niż druga (rozmiar tego przesunięcia w fazie można kontrolować). Obie wiązki zostają następnie połączone, w wyniku czego interferują (stanowi to fotonowy odpowiednik doświadczenia z Tybingi, w którym elektrony są „rozszczepiane na pół”, a ich faza jest poddawana przesunięciu). Na drodze obu

wiązek można umieścić detektory zwane komórkami Pockelsa, które monitorują przechodzące fotony, natomiast detektory umieszczone na końcu układu sprawdzają, czy połączone wiązki dają obraz interferencyjny.

Komórki Pockelsa można włączać i wyłączać bardzo szybko, w ciągu około 9 miliardowych części sekundy. Odległość od płytki światło-dzielącej do detektorów mierzona wzdłuż drogi, którą przebywa światło, wynosiła około 4,3 metra. Aby pokonać ten dystans, podróżujący z prędkością światła foton potrzebuje około 14,5 miliardowych części sekundy. Można zatem ustawić układ w ten sposób, że komórki Pockelsa włącza się (lub wyłącza) po przejściu światła przez płytkę światłodzielącą (decyzję o ich włączeniu lub wyłączeniu musi oczywiście podjąć komputer w sposób losowy, za pomocą odpowiedniej procedury losującej). Wyniki uzyskane przez obie grupy badaczy i tym razem były zgodne z przewidywaniami mechaniki kwantowej. Przy włączonych detektorach światło zachowywało się jak fotony biegnące jedną lub drugą drogą (w wiązce światła długiej na 4,3 metra jest oczywiście wiele fotonów; każdy z nich musi „zdecydować”, jak ma się zachować, zanim dotrze do detektorów), a na ekranie nie pojawił się obraz interferencyjny. Przy wyłączonych detektorach światło zachowywało się jak fala - nawet wtedy, gdy w płytkę światłodzielącą strzelano pojedynczymi fotonami - rozszczepiająca się na dwie wiązki i interferująca po przejściu przez układ. Zachowanie fotonów przy przejściu przez płytkę światłodzielącą zmienia się w zależności od tego, w jaki sposób mamy z a m i a r na nie patrzeć, nawet wtedy, gdy sami jeszcze nie zdecydowaliśmy o tym, jak mamy zamiar na nie patrzeć!

Jest to imponujący przykład urzeczywistnienia eksperymentu myślowego, ale wykazana w nim zdolność fotonu do przewidywania z góry, czy detektory będą włączone czy wyłączone w momencie, gdy foton do nich dotrze, dotyczy zaledwie kilku miliardowych części sekundy, więc być może nie warto się za bardzo cieszyć tak ograniczoną umiejętnością przewidywania. Tu właśnie otwiera się pole dla kosmicznej wersji myślowego eksperymentu Wheelera, który opracował ją na początku lat osiemdziesiątych.

Wheeler zwrócił uwagę, że można wykorzystać zjawisko zwane ogniskowaniem grawitacyjnym, aby stworzyć kosmiczną wersję eksperymentu z dwoma otworami. W owym czasie nikt nie był pewien, czy da się wykryć ogniskowanie grawitacyjne za pomocą umieszczonych na Ziemi teleskopów, ale w późniejszych latach zaobserwowano to zjawisko kilkakrotnie. Polega ono na tym, że światło odległego o miliardy lat świetlnych kwazara (jeden rok świetlny jest równy odległości, jaką światło pokonuje w ciągu jednego roku; aby zdać sobie sprawę ze skali tych zjawisk, zwróćmy uwagę, że Słońce jest od nas odległe o 150 milionów kilometrów, a światło słoneczne dociera na Ziemię w czasie krótszym od 500 sekund) przechodzi przez galaktykę znajdującą się gdzieś na linii łączącej kwazar i Ziemię. Jeżeli galaktyka ustawiona jest w pewien określony sposób względem tej „linii wzroku”, to grawitacja galaktyki zakrzywi tor światła na jego drodze do Ziemi. Fotony będą miały możliwość wyboru jednej z dwóch dróg wokół galaktyki, podobnie jak elektrony mają możliwość wyboru jednej z dwóch dróg wokół elektrycznie

naładowanego drutu w doświadczeniu z interferometrem elektronowym. Z punktu widzenia ziemskiego obserwatora fotony utworzą dwa obrazy kwazara, po dwóch stronach obrazu galaktyki.

W zasadzie powinno być możliwe połączenie wiązek światła tworzących te dwa obrazy, w celu uzyskania efektu interferencyjnego. Byłby to „dowód” na to, że w czasie podróży wokół galaktycznej przeszkody światło zachowuje się jak fala. Można jednak także ustawić komórki Pockelsa (lub coś podobnego) na drodze fotonów przybywających na Ziemię z obu stron przeszkody i tworzących dwa obrazy. Jeżeli będziemy monitorować fotony, a następnie doprowadzimy do ich spotkania na ekranie, to teoria kwantowa przewiduje, że obraz interferencyjny nie powstanie. To z kolei byłby „dowód” na to, że światło zachowuje się jak strumień cząstek, z których każda wybiera jedną drogę wokół stojącej na drodze galaktyki.

Trudność z realizacją tego eksperymentu myślowego w praktyce (czyli powód, dla którego w latach osiemdziesiątych wszyscy sądzili, że eksperyment na zawsze pozostanie myślowy) polega na tym, że rozmiar zakrzywiającej tor światła galaktyki jest tak duży, iż zaciera informację niesioną przez obie wiązki. Każde źródło światła ma pewien charakterystyczny czas spójności - czas, w ciągu którego emitowane przez źródło światło „maszeruje” równym krokiem. Fale świetlne wyemitowane w dłuższych odstępach czasu nie są już nawzajem zsynchronizowane, lecz rozchodzą się w przypadkowy i nieprzewidywalny sposób. Różnica długości dwóch dróg światła wokół galaktyki wynosi kilka tygodni świetlnych. Jest to znacznie więcej niż czas spójności światła kwazara. Informacja zostaje utracona i nie może być użyta do uzyskania obrazu interferencyjnego na Ziemi.

W 1993 astronomowie odkryli jednak inną formę ogniskowania grawitacyjnego. Związana jest ona z istnieniem masywnego, niewidocznego obiektu w naszej Galaktyce, który przesuwają się na tle gwiazdy należącej do innej galaktyki. Na skutek ich względnego ruchu docierające do nas światło gwiazdy migocze w miarę przesuwania się w naszym polu widzenia różnych grawitacyjnie zogniskowanych obrazów gwiazdy. Ten masywny obiekt prawdopodobnie nie jest większy od Jowisza, dzięki czemu różnica dróg optycznych jest odpowiednio mniejsza od różnicy wynikającej z ogniskowania galaktycznego. W miarę ulepszania konstrukcji teleskopów i poprawy uzyskanych dzięki nim obrazów powinna pojawić się możliwość zaobserwowania efektów interferencyjnych w świetle odległych gwiazd, a nawet kwazarów. Potem wystarczy już tylko wstawić w układ komórkę Pockelsa i zniszczyć interferencję.

Zwróćmy raz jeszcze uwagę na skalę czasową tych zjawisk. Fotony docierające do naszych teleskopów i wpadające do detektorów mogły wyruszyć w drogę miliard lat temu z kwazara odległego od nas o 10^{22} kilometrów. Mają one do wyboru dwie drogi w kierunku Ziemi. Mogą podążać jedną z nich, mogą podążać drugą, mogą też w tajemniczy sposób rozszczepić się i podążać obiema drogami równocześnie. Wydaje się, że wybór jednej z tych możliwości, dokonany miliard lat temu i 10^{22} kilometrów stąd, zależy od tego, czy astronom na Ziemi, pod koniec dwudziestego lub może z początkiem dwudziestego pierwszego wieku, zdecyduje się włączyć lub wyłączyć komórkę Pockelsa przymocowaną do swojego teleskopu.

Błąd tego rozumowania polega, zdaniem Wheelera,

na założeniu, że przed dokonaniem przez astronoma obserwacji foton miał jakąś fizyczną formę. Albo był cząstką, albo falą. Albo podążył jedną drogą wokół galaktyki, albo dwiema drogami. W rzeczywistości zjawiska kwantowe nie są ani cząstkami, ani falami, lecz są inherentnie nieokreślone aż do momentu pomiaru. W pewnym sensie rację miał angielski filozof, biskup George Berkeley, gdy stwierdził dwa wieki temu, że „istnieć znaczy być postrzeganym”⁷⁵.

Nie jestem pewien, czy to rzeczywiście pomaga zrozumieć problem. Jakkolwiek się to przedstawi, w kosmicznej wersji doświadczenia z opóźnionym wyborem ewidentnie odbywa się coś bardzo dziwnego. Wydaje się, że cały wszechświat „wie”, z wyprzedzeniem, jaki eksperyment ma zamiar przeprowadzić pojedyncza istota ludzka za kilka lat na szczycie góry w Chile. Wheeler posunął się właściwie aż do sugestii, że cały wszechświat istnieje wyłącznie dlatego, że ktoś go obserwuje - że wszystko, co się zdarzyło w ciągu 15 miliardów lat od wielkiego wybuchu było nieokreślone, dopóki nie zostało zauważone. To oczywiście rodzi poważne pytanie o to (podobnie jak w przypadku eksperymentu z kotem w pudle), jakiego rodzaju istoty byłyby dostatecznie bystre, aby zauważyć, że istnieją (a wraz z nimi cała reszta wszechświata), i spowodować redukcję kosmicznej funkcji falowej. Wrócimy do tych zagadnień w następnym rozdziale, a teraz poczynimy dygresję i omówimy eksperyment myślowy, który sugeruje, że redukcję funkcji falowej układu może spowodować b r a k obserwacji.

Ten wspaniały przykład ilustrujący dziwną naturę kwantowego świata pochodzi z początku lat pięćdziesiątych i jest znany jako „eksperyment z negatywnym wynikiem Rennigera” - od nazwiska jego autora, niemieckiego fizyka Mauritiusa Rennigera. Spośród przykładów dziwności kwantowego świata ten należy do najłatwiejszych do zrozumienia - ale nie do wytłumaczenia.

W mojej nieznacznie zmodyfikowanej wersji tego doświadczenia wyobraźmy sobie, że mamy źródło, które może wyemitować pojedynczą cząstkę w przypadkowym kierunku (tak właśnie robią wszystkie radioaktywne jądra, więc na razie nie ma w tym nic niezwykłego). Źródło to umieszczone jest w środku dużej pustej czaszy pokrytej od wewnątrz materiałem, który reaguje błyskiem światła w miejscu zetknięcia cząstki z czaszą. Kwantowy opis procesu emisji cząstki zakłada, że fala prawdopodobieństwa cząstki rozchodzi się równomiernie we wszystkich kierunkach wokół źródła, ponieważ wszystkie kierunki są jednakowo prawdopodobne. Gdy fala prawdopodobieństwa dotrze do wewnętrznej powierzchni czaszy, redukuje się i w tym samym momencie następuje błysk światła. Cząstka jest „realna” tylko w momencie obserwacji - gdy wytwarza błysk światła - a nie w trakcie podróży od źródła do czaszy.

Jak dotąd wszystko jest jasne. Wyobraźmy sobie jednak, że w połowie drogi od źródła do czaszy znajduje się przeszkoda - w kształcie połowy czaszy i o promieniu o połowę mniejszym od zewnętrznej czaszy, ustawiona współśrodkowo względem niej - która blokuje dokładnie połowę

⁷⁵ „Świat Nauki”, wrzesień 1992, s. 81 (przyp. tłum.).

zewnątrznej czaszy w polu widzenia źródła i która od wewnętrznej strony jest również wyłożona materiałem reagującym błyskiem światła na uderzenie przez cząstkę. Co się teraz stanie, gdy źródło wyemituje cząstkę?

Można stworzyć bardzo prosty kwantowy opis możliwych wyników tego eksperymentu, który zakłada istnienie tylko dwóch stanów końcowych. Nie jesteśmy zainteresowani informacją o tym, w jakim dokładnie miejscu cząstka generuje błysk światła, lecz jedynie o tym, czy trafi ona na zewnętrzną czy na wewnętrzną przeszkodę - na czaszę czy na półczaszę. W przedstawionym powyżej przykładzie szanse na oba te zdarzenia są jednakowe. Przypuśćmy, że w pewnej chwili pobudzamy źródło do wyemitowania cząstki. Teoria kwantowa opisuje ruch cząstki jako sferyczną falę prawdopodobieństwa rozchodzącą się równomiernie we wszystkich kierunkach. Czekamy przez czas dłuższy niż czas potrzebny na to, aby fala dotarła do wewnętrznej przeszkody (półczaszy), ale krótszy niż czas potrzebny na dotarcie do zewnętrznej czaszy - i nie widzimy błysku. W tym momencie *w i e m y*, że eksperyment da w wyniku końcowym błysk od zewnętrznej czaszy - cząstka została wyemitowana w takim kierunku, gdzie wewnętrzna przeszkoda nie sięga. Kwantowa fala prawdopodobieństwa zredukowała się od 50% szansy, że błysk światła pojawi się albo na jednej, albo na drugiej przeszkodzie, do 100% pewności, że błysnie zewnętrzna czasza. Zmiana ta zaszła, mimo że obserwator niczego nie zaobserwował, nastąpiła tylko zmiana stanu wiedzy obserwatora na temat ewoluującego w czasie układu. Obserwator ten musi być dostatecznie inteligentny, aby wiedzieć, co by się stało, gdyby cząstka trafiła na wewnętrzną przeszkodę, i wyciągnąć wnioski z przebiegu wydarzeń (tak więc kot nie byłby dostatecznie inteligentny, aby spowodować tego rodzaju redukcję funkcji falowej). W tych okolicznościach *b r a k* obserwacji może równie skutecznie jak obserwacja spowodować redukcję kwantowej funkcji falowej. W każdym razie tak mówi interpretacja kopenhaska.

Rola obserwatora - i to obserwatora inteligentnego - stanowi kluczowy element standardowej kopenhaskiej interpretacji mechaniki kwantowej. Jest ona jednak bardzo trudna do zrozumienia i uzasadnienia, i funkcjonuje raczej na zasadzie rozpaczliwej, a zarazem pragmatycznej próby ratowania teorii - w formie kwantowej książki kucharskiej, której można użyć do uzyskania określonych rezultatów bez konieczności zrozumienia, w jaki sposób kwantowe ciasto się piecze.

Chociaż przez ponad pół wieku większość fizyków korzystała z kwantowych przepisów kucharskich, nie zaprzatając sobie głowy kwestiami interpretacyjnymi, to zawsze istniały alternatywne sposoby interpretacji kwantowego świata. Mimo ożywionej dyskusji nad nimi wszystkie miały niestety podobne usterki jak interpretacja kopenhaska. Warto jednak przyjrzeć się im pobieżnie, aby zrozumieć, co właściwie powinna wytłumaczyć porządna interpretacja teorii kwantowej, żebyśmy umieli docenić tę, którą poznamy pod koniec tej książki.

Rozdział czwarty

Desperackie próby

Jedną z najbardziej zadziwiających właściwości teorii kwantowej jest fakt, że istnieje wiele różnych jej interpretacji, z których większość jest wzajemnie sprzeczna w sensie filozoficznym, lecz wszystkie one prawidłowo wyjaśniają znane dotąd zjawiska i prawidłowo przewidują wyniki coraz to nowych eksperymentów. **W s z y s t k i e** spełniają też Newtonowskie kryterium dobrej teorii!⁷⁶. Z niczym takim nie spotykamy się w żadnej innej dziedzinie nauki - nie mamy, na przykład, pół tuzina lub więcej różnych interpretacji ogólnej teorii względności Einsteina, drugiej wielkiej teorii dwudziestowiecznej fizyki.

Ten wybór interpretacji teorii kwantowej przypomina w pewnym sensie wybór, jakiego musi dokonać foton, gdy biegnie przez układ w eksperymencie z dwiema (lub więcej) szczelinami. Wydaje się, że foton potrafi wybrać równocześnie dwie drogi, mimo że w codziennym świecie te dwie możliwości wzajemnie się wykluczają. Wygląda na to, że teoria kwantowa jest otwarta na różne wzajemnie sprzeczne interpretacje, lecz - podobnie jak podążający równocześnie dwiema drogami foton - wszystkie one są w jakimś sensie poprawne. Niektórzy fizycy (w szczególności Heinz Pagels, autor *The Cosmic Code* [Kosmiczny szyfr]) mówią, że zamiast próbować ustalić jedną „poprawną” interpretację, powinniśmy starać się poznać kwantowy świat, studiując wszystkie interpretacje, traktując je jak swego rodzaju superpozycję różnych możliwości. Jednak niewielu ekspertów wykazuje dostatecznie elastyczne podejście, aby zaakceptować ten pogląd. Wydaje się, że każdy fizyk (spośród tych, którzy w ogóle zawierają sobie głowę tymi zagadnieniami) trzyma się kurczowo swojej jednej wybranej „prawdziwej” interpretacji, a wszystkie pozostałe uważa za fałszywe.

Charakter tej debaty - jeżeli nie jest to zbyt łagodne słowo - został znakomicie ukazany w połowie lat osiemdziesiątych, gdy Paul Davies (w owym czasie profesor fizyki na uniwersytecie w Newcastle nad rzeką Tyne) i Julian Brown (producent radia BBC) połączyli swe talenty i stworzyli program o teorii kwantowej. Przeprowadzili wywiady z ośmioma czołowymi fizykami zajmującymi się podstawami mechaniki kwantowej, którzy przedstawili swoje opinie na temat kwantowych tajemnic i sposobów ich wyjaśnienia. Pełny tekst wywiadów został później opublikowany w formie książki zatytułowanej *Duch w atomie*. Oto mamy ekspertów uroczyście zapewniających, że jedna i tylko jedna interpretacja jest poprawna, a pozostałe są niemożliwe. Problem polega na tym, że eksperci nie zgadzają się co do tego, która z nich jest poprawna. Wolni od jakichkolwiek wątpliwości, prawie wszyscy lansują różne wersje rzeczywistości i odrzucają inne. W bardzo jasny i przystępny sposób książka pokazuje rozłam nie tylko między różnymi interpretacjami, lecz także

⁷⁶ Z zastrzeżeniem, że nie są to, ściśle rzecz biorąc, teorie, lecz interpretacje teorii (przyp. tłum.).

między samymi interpretatorami. Będę się na nią powoływał w dalszej części tego rozdziału, aby podkreślić te różnice.

Kopenhaski kolaps

Status interpretacji kopenhaskiej jako oficjalnego wyjaśnienia kwantowej rzeczywistości jest częściowo wynikiem historycznego zbiegu okoliczności, a częściowo śmiesznego błędu popełnionego przez jednego z najwybitniejszych matematyków obecnego stulecia. Historyczny przypadek polega na tym, że była to pierwsza interpretacja, która prawidłowo funkcjonowała - w tym sensie, że dawała przepisy, których kwantowi kucharze mogli użyć do wypieku kwantowych ciast bez potrzeby zastanawiania się nad aspektami filozoficznymi i głębinami kwantowych tajemnic (nie bez znaczenia była też osobowość jej twórcy, Nielsa Bohra, uczonego obdarzonego wyjątkowym darem przekonywania). Interpretacja kopenhaska sprawdzała się w praktyce, więc niewielu kwantowych mechaników zwracało sobie głowę jej głębszymi implikacjami.

W tym momencie czytelnik powinien już mieć dobrze ugruntowane wyobrażenie o tym, o czym właściwie mówi interpretacja kopenhaska - połączenie komplementarności, fal prawdopodobieństwa i redukcji funkcji falowej - i nie ma potrzeby powtarzania wszystkich szczegółów. Pamiętajmy jednak, że jeden z trzech jej filarów - komplementarność w wersji przedstawionej przez Bohra - został zachwiany przez eksperymenty, w których pojedynczy foton zachowuje się równocześnie jak cząstka i jak fala. Pamiętajmy także, iż w opinii szkoły kopenhaskiej obiekt kwantowy, taki jak elektron lub foton, *n i e p o s i a d a* niektórych właściwości, takich jak położenie lub pęd, dopóki nie zostaną one zmierzone. Nie tylko nie znamy tych właściwości - teoria mówi, że nie istnieją, jeżeli nie są obserwowane.

Sprawa ta uwidacznia poważny problem z interpretacją kopenhaską. *K i e d y* (lub *g d z i e*) właściwie odbywa się redukcja funkcji falowej? Czy licznik Geigera może wykryć wyemitowaną przez radioaktywny atom cząstkę i spowodować kolaps funkcji falowej całego układu, na który składa się eksperyment Schrödingera z kotem w pudle? Bez wątplenia nie, zważywszy na implikacje eksperymentu Rennigera, w którym *b r a k* pomiaru powoduje redukcję funkcji falowej! Czy zatem świadomość, a może nawet inteligencja, stanowi niezbędny element kolapsu funkcji falowych?

Filozoficznie usposobieni fizycy już od pierwszych dni istnienia interpretacji kopenhaskiej rozważali problem, gdzie przebiega granica rozdzielająca świat kwantów od klasycznego otoczenia. Ortodoksyjni wyznawcy szkoły kopenhaskiej twierdzą, że to, co my uważamy za fizyczny atrybut samego elektronu, jest w rzeczywistości tylko zależnością między elektronem a aparaturą. Innymi słowy, że właściwości elektronów „należą” do całego układu, a nie tylko do elektronów. Amerykański fizyk, David Mermin, w swoim wystąpieniu na posiedzeniu British Association for the Advancement of Science w sierpniu 1993 roku, zaproponował szczególnie udaną analogię do powyższego poglądu.

Natura inteligencji, a także wpływ czynników dziedzicznych, środowiskowych i edukacyjnych na jej rozwój jest przedmiotem zawziętej debaty wśród psychologów i biologów. Stworzyli oni testy I.I.,

które mierzą tak zwany iloraz inteligencji istot ludzkich. Chociaż wiele lat temu uważano, że testy I.I. są miarą inteligencji, obecnie panuje pogląd, że mierzą one jedynie zdolność ludzi do rozwiązywania testów I.I. Wrodzona inteligencja może być pomocna w rozwijaniu tej zdolności, lecz nie jest ona jedynym czynnikiem. Wynik eksperymentu (poddania kogoś testowi) zależy od natury samego eksperymentu (aby użyć trywialnego przykładu - jeżeli pytania testu są napisane po rosyjsku, to osoba nie znająca tego języka nie ma szansy na wysoki wynik).

Na podobnej zasadzie mierząc pęd elektronu, mierzymy raczej zdolność elektronu do udzielania odpowiedzi na pytanie o pęd. Elektron może w istocie nie mieć takich właściwości jak pęd - w takim sensie, jak rozumiemy klasyczny pęd - lecz ma on inne właściwości, dzięki którym w określony sposób odpowiada na pytanie dotyczące pędu. Uzyskujemy odpowiedź - wynik eksperymentu - który interpretujemy jako miarę pędu. Ale wynik ten mówi nam jedynie o zdolności elektronu do udzielania odpowiedzi na test pędu, a nie o samym pędzie elektronu, podobnie jak wyniki testów I.I. mówią o umiejętności rozwiązywania testów I.I., a nie o samej inteligencji.

Jeszcze inną analogię stworzył amerykański fizyk, Nick Herbert. Bohr powiedział, że pojedyncze cząstki materialne nie istnieją, lecz są abstrakcjami, które identyfikujemy tylko na podstawie ich oddziaływania z innymi układami - na przykład wtedy, gdy „mierzymy” pęd elektronu. Herbertowi kojarzy się to z tęczą⁷⁷. Tęcza nie istnieje jako obiekt materialny i znajduje się w różnych miejscach z punktu widzenia różnych obserwatorów. Dwie osoby nigdy nie widzą tej samej tęczy (w gruncie rzeczy każde z dwojga oczu widzi trochę inną tęczę). Mimo to tęcza jest realna - można ją sfotografować. Równie dobrze można jednak powiedzieć, że tęcza nie jest realna, jeżeli nie jest obserwowana lub fotografowana. Na tej samej zasadzie, zdaniem Bohra, właściwości obiektów kwantowych, takich jak elektron, są pewnego rodzaju iluzją stworzoną przez ich oddziaływanie z układem doświadczalnym.

W tej podstawowej wersji interpretacji kopenhaskiej „faktem” lub „zdarzeniem” jest odnotowany przez przyrząd wynik pomiaru - tyknięcie licznika Geigera lub błysk światła oznaczający przybycie elektronu do ekranu detektora. Skoro jednak urządzenia pomiarowe są także zbudowane z elektronów, atomów i innych obiektów kwantowych, to dlaczego urządzenia te nie są opisywane w tych samych kategoriach, co obiekty kwantowe? Licznik Geigera można w zasadzie opisać jako falę prawdopodobieństwa. Istnieje on jako superpozycja stanów („tyknięcie” i „brak tyknięcia”) tak długo, aż zostanie wykonany na nim pomiar. Możemy wyobrazić sobie, że detektor jest urealniany przez monitorujący go drugi detektor, lecz wtedy ten drugi detektor (jak kot Schrödingera) istnieje jako superpozycja stanów, więc potrzebny jest monitorujący go trzeci detektor i tak dalej w nieskończoność. W rezultacie niektórzy kwantowi interpretatorzy doszli do wniosku, że to coś, co powoduje redukcję funkcji falowej, mieści się w mózgach inteligentnych obserwatorów.

⁷⁷ N. Herbert, *Quantum Reality*, s. 162.

Myszę, więc

Jest to nadal interpretacja kopenhaska, a w każdym razie jedna z jej odmian. Jak mówi Peierls (niereformowalny wyznawca szkoły kopenhaskiej), „proces [redukcji funkcji falowej] trwa tak długo, aż wreszcie odrzucimy jedną możliwość i zostawimy drugą, ponieważ u s w i a d a m i a m y sobie, że eksperyment dał określony wynik”⁷⁸.

Ten ciąg rozumowania doprowadził Johna Wheelera do wniosku, że wszechświat istnieje tylko dlatego, że na niego patrzymy. W tej interpretacji mechaniczno-kwantowy opis jest postrzegany w kategoriach w i e d z y , a istnienie umysłu okazuje się absolutnie niezbędnym. Nie ma to nic wspólnego z tezą, że rozgraniczenie między światem klasycznym i kwantowym jest kwestią skali, aczkolwiek ta druga koncepcja także podpada pod interpretację kopenhaską. Również i tutaj zachodzi pytanie, gdzie leży granica. Roger Penrose z uniwersytetu w Oksfordzie, w książce *Nowy umysł cesarza*, sugeruje (moim zdaniem, nieprzekonująco), że ma tu coś do powiedzenia grawitacja. Grawitacja jest bardzo słabą siłą, zaniedbywalną dla obiektów takich jak elektron. Rozumując w ten sposób, Penrose dochodzi do wniosku, że znaczna ilość materii, na tyle duża, aby grawitacja stała się zauważalna, powoduje zniszczenie „kwantowości” i zamienia obiekt w „klasyczny”. Penrose wysuwa wiele wyszukanych argumentów związanych z utratą informacji w czarnych dziurach oraz kompensacją tej straty przez kwantową aktywność w innych obszarach wszechświata, lecz cały ten ciąg rozumowania zupełnie do mnie nie przemawia. Nieco bardziej przekonująca jest propozycja Davida Bohma, który sugeruje, że za rozmywanie granic kwantowego świata może być odpowiedzialne ciepło. Każdy atom i każdy elektron (w przeciętnych warunkach termicznych) znajduje się w ciągłym ruchu określanym jako ruch termiczny. Być może kwantowość obiektów niszczy dostatecznie duża liczba cząstek poddanych losowym ruchom termicznym.

Argumenty te nie przekonują jednak tych interpretatorów kwantowych, którzy widzą wszystko w kontekście „wnętrza umysłu”. Dla nich nawet obiekt tak duży jak Księżyc - wypełniony przez poddane chaotycznym ruchom termicznym atomy, które utrzymuje w całości grawitacja - nie istnieje, jeżeli nikt na niego nie patrzy. Do zwolenników tej koncepcji zalicza się David Mermin z Cornell University. Twierdzi on, że Księżyc nie znika natychmiast, gdy nikt na niego nie patrzy, lecz - podobnie jak opisane w rozdziale trzecim jony berylu w kwantowym czajniku - jego atomy, elektrony i inne kwantowe składniki zaczynają tracić pewność co do swego kwantowego stanu. Fale prawdopodobieństwa zaczynają się powoli rozmywać i odchodzić od kwantowego stanu, w którym je ostatnio widziano. Księżyc zaczyna się zamieniać w kwantowe widmo. Proces ten odbywa się jednak bardzo powoli, ponieważ Księżyc jest bardzo duży. Żeby całkowicie się rozpuścić w kwantowej nieokreśloności, Księżyc potrzebuje nie nanosekund, lecz milionów (być może miliardów) lat. Na długo zanim to się stanie, ktoś popatrzy na Księżyc, zredukuje jego funkcję falową i przywróci mu jego dobrze określony stan, wraz z precyzyjnie umiejscowionym

⁷⁸ P. Davies, IR. Brown (red.), *Duch w atomie*, s. 93.

środkiem masy, ulokowanym na orbicie okołoziemskiej. W tej interpretacji istnienie Księżyca (i wszystkiego innego) jako realnego obiektu jest uważane za jeszcze jeden efekt związany z obserwowaniem kwantowego czajnika.

Sytuację zwięźle podsumował John Bell. Opisał on, co się dzieje, gdy elektrony są wystrzelwane w kierunku ekranu scyntylacyjnego, ekran jest fotografowany, a potem ktoś ogląda fotografię, żeby zobaczyć wynik eksperymentu:

Jest to romantyczna alternatywa [wobec poglądu, że rozdział między kwantowym i klasycznym światem jest kwestią skali]. Zakłada ona, że istnieje granica, ostra lub płynna [...] między obszarem „kwantowym” i „klasycznym”. Zamiast jednak ustawić tę granicę gdzieś między dużym i małym, zostaje ona umieszczona między (by tak rzec) „materią” i „umysłem”. Gdy próbujemy stworzyć możliwie pełny kwantowy opis działającego elektronowego, dodajemy kolejno ekran scyntylacyjny, płytę fotograficzną, odczynniki chemiczne, oko eksperymentatora [...] a następnie (czemu nie?) jego mózg. Mózg składa się jednak z atomów, elektronów i jąder, więc dlaczego mielibyśmy wahać się przed zastosowaniem mechaniki kwantowej [...] w każdym razie, gdybyśmy byli dostatecznie odważni, aby porywać się na obliczenia tak skomplikowanego układu atomów. Poza mózgiem jest jeszcze [...] umysł. Bo chyba umysł nie jest materialny? W końcu doszliśmy do czegoś, co jest wyraźnie odmienne od szklanego ekranu i żelatyny fotograficznej⁷⁹.

Interpretatorzy kwantowi, którzy próbują rozwijać te idee, czasami sugerują, że sam mózg jest w jakimś sensie wyróżnionym układem kwantowym, funkcjonującym holistycznie i nieliniowo, dzięki czemu jest on szczególnie podatny do redukcji funkcji falowych. Zjawiska kwantowe z pewnością odgrywają rolę w procesie myślenia i świadomości. Układ nerwowy człowieka (łącznie z mózgiem) funkcjonuje na zasadzie transmisji impulsów elektrycznych, a także dzięki elektrochemicznym procesom zachodzącym na styku komórek nerwowych (za pośrednictwem synaps łączących poszczególne komórki). Biegący wzdłuż nerwu impuls wyzwala jony wapnia, które przedostają się do następnego nerwu i uruchamiają kolejny impuls. Pojedynczy jon wapnia musi w tym celu pokonać odległość około 50 miliardowych części metra w czasie około 200 milionowych części sekundy. Jak zauważył Henry Stapp z University of California w Berkeley, „proste oszacowanie oparte na zasadzie nieoznaczoności pokazuje, że paczka falowa jonu wapnia musi rozszerzyć się do rozmiarów o wiele rzędów wielkości większych niż rozmiary samego jonu, więc koncepcja pojedynczej klasycznej trajektorii staje się zupełnie nieprzydatna: muszą zostać wykorzystane pojęcia kwantowe”⁸⁰.

⁷⁹ J.S. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, s. 191. Należy podkreślić, że to nie są poglądy Bella na kwantową rzeczywistość, lecz poglądy Bella’a argumenty wysuwane między innymi przez Eugene’a Wignera i Johna Wheelera.

⁸⁰ H. Stapp, *Mind, Matter, and Quantum Mechanics*, s. 152.

Jest to słuszne i nawet dość oczywiste, gdy już się zwróci na to uwagę, lecz komentarz Stappa zasadniczo nie jest sprzeczny z uwagą Bella, że mózg składa się z atomów, więc musi przestrzegać praw mechaniki kwantowej. Nie wynika z tego na przykład, że kwantowość ludzkiego mózgu oznacza, iż żaden komputer nie będzie miał świadomości, aczkolwiek próbowano uzasadniać taki pogląd. W końcu komputery też są zbudowane z atomów i też przestrzegają praw mechaniki kwantowej. Gdyby okazało się na przykład, że istotnym elementem świadomości są jakieś konkretne właściwości jonów wapnia, rozszerzających swój obszar nieoznaczoności w pobliżu synaps, to konstrukcja sztucznego mózgu funkcjonującego na podstawie podobnego mechanizmu byłaby (w zasadzie) bezproblemowa.

Poprzestaśmy na tym. Chociaż niektórzy ludzie podążają jeszcze dalej tymi mistycznymi szlakami, nie pójdziemy w ich ślady. Mam nadzieję, że pokazałem, dokąd prowadzi interpretacja kopenhaska, jeżeli się ją potraktuje konsekwentnie, i że nie jest to całkowicie satysfakcjonująca metoda wyjaśnienia kwantowej rzeczywistości. Sukces zawdzięcza ona w dużej mierze historycznemu przypadkowi, czyli temu, że była to pierwsza w pełni dopracowana interpretacja, a także temu, że była lansowana przez wyjątkową osobowość. Murray Gell-Mann, laureat Nagrody Nobla z fizyki, skomentował to następująco (w 1976 roku): „Niels Bohr zdołał otumanić całe pokolenie fizyków, którzy uwierzyli, że problem jest rozwiązany”⁸¹. Udało mu się między innymi dlatego, że jedyną znaną w owym czasie konkurencyjną interpretację podważyło pewne twierdzenie udowodnione przez matematyka, Johna von Neumanna. Prawda jest jednak taka, że von Neumann się pomylił.

Śmieszna pomyłka von Neumanna

Pomyłka von Neumanna była szczególnie niefortunna, gdyż wydawało się, że jego twierdzenie wyklucza interpretację mechaniki kwantowej znacznie bliższą naszym naiwnym poglądom na rzeczywistość niż interpretacja kopenhaska. Fizycy (podobnie zresztą jak inni naukowcy) są zadziwiająco konserwatywni - trzymają się starych koncepcji tak długo, jak to możliwe, dopóki niepodważalne dowody eksperymentalne nie zmuszą ich do zmiany poglądów. Gdyby konkurencyjna względem interpretacji kopenhaskiej teoria „fali pilotującej” (jedna z wersji interpretacji znanej obecnie jako teoria ukrytych parametrów lub teoria zmiennych ukrytych) miała szansę stanąć do walki, to wydaje się wielce prawdopodobne, że wygrałaby „z rękami w kieszeniach”. Całe pokolenie fizyków zostałoby wychowane w przekonaniu, że standardową interpretacją kwantowej rzeczywistości jest teoria zmiennych ukrytych, a interpretacja kopenhaska byłaby pamiętana jako interesująca alternatywa przedstawiona przez Bohra, jeżeli nawet nie wskutek starczego zdziecinnienia, to w każdym razie w okresie, gdy wszystkie wielkie odkrycia miał on już za sobą.

⁸¹ M. Gell-Mann, *The Nature of the Physical Universe* [Natura fizycznego wszechświata], Wiley, New York, s. 29.

Istotnym elementem teorii zmiennych ukrytych jest założenie, że obiekt taki jak elektron może istnieć jako rzeczywista - w potocznym sensie tego słowa - cząstka, z realnym pędem i realnym położeniem całkowicie określonym przez cały czas. Nie możemy jednak zmierzyć właściwości elektronu z nieograniczoną dokładnością. Teoria mówi, że zachowaniem cząstek rządzi pewne zjawisko - zwykle przedstawiane w kategoriach nowego pola - którego zmian nie da się bezpośrednio zmierzyć. Ukryte zmiany tego pola kierują ruchem cząstek na poziomie kwantowym. Znajomość tego pola pozwoliłaby fizykom przewidywać faktyczne rezultaty eksperymentów, a nie tylko prawdopodobieństwa różnych rezultatów. Mogliby na przykład obliczyć, czy kot Schrödingera jest żywy czy martwy bez konieczności zaglądnania do pudła.

Pierwsza wersja teorii zmiennych ukrytych została sformułowana w 1925 roku przez francuskiego arystokratę, Louisa de Broglie'a (1892-1987), który dosyć późno zaczął swą karierę naukową - częściowo dlatego, że jego edukację przerwała pierwsza wojna światowa. Był on pierwszą osobą, która zdała sobie sprawę, że elektrony można opisać w kategoriach falowych. W pierwszej połowie lat dwudziestych próbował pogodzić to odkrycie z faktem, że elektrony pod wieloma względami zachowują się jednak jak cząstki, i znalazł bardzo obiecujące rozwiązanie. Niestety de Broglie, mimo swego arystokratycznego pochodzenia (w 1960 roku, po śmierci swego starszego brata, de Broglie odziedziczył zarówno francuski tytuł *Duc*, jak i niemiecki *Prinz*), nie miał takiej siły przebicia jak Bohr i nie walczył o swoją ideę, gdy w latach trzydziestych została ona zakwestionowana. Koncepcja de Broglie'a opiera się na pojęciu fali pilotującej, która przestrzega probabilistycznych praw mechaniki kwantowej i zarazem decyduje o zachowaniu cząstek. Same cząstki, na przykład elektrony, są realnymi obiektami (w zwykłym znaczeniu tego słowa), lecz o ich ruchu decyduje fala pilotująca.

Pomysł ten nie spotkał się z przychylnym przyjęciem ze strony szkoły kopenhaskiej, a w 1932 roku popadł w ostateczną niełaskę, gdy von Neumann opublikował przełomową książkę o teorii kwantowej, w której między innymi zawarł matematyczny dowód na to, że żadna teoria zmiennych ukrytych nie może poprawnie opisywać zachowania obiektów kwantowych.

Fizycy uwierzyli mu na słowo, ponieważ von Neumann był jednym z najwybitniejszych matematyków swoich czasów. Urodzony w 1903 roku w Budapeszcie (naprawdę miał na imię Johann, ale później zaczął używać angielskiego odpowiednika „John”) von Neumann wynalazł gałąź matematyki znaną jako teoria gier, która polega na konstruowaniu matematycznych modeli (układów równań) do szukania najlepszej strategii rozgrywania gier, czyli do badania, jak uzyskać maksymalną liczbę wygranych, a przynajmniej, jak unikać strat. Teoria gier rozwinęła się w poważną dziedzinę matematyki, częściowo dzięki zastosowaniom w grach wojennych, a także w konstruowaniu modeli ekonomicznych. Von Neumann był także pierwszą osobą, która zasugerowała, że do wywołania kolapsu funkcji falowej i do wybrania jednej alternatywy spośród superpozycji stanów kwantowych może być potrzebny świadomy obserwator.

W 1930 roku von Neumann przeniósł się do USA, a w 1933 roku został najmłodszym członkiem Instytutu Studiów Zaawansowanych w Princeton (który został właśnie założony, częściowo w celu

stworzenia bazy dla Alberta Einsteina). Brał udział w pionierskich pracach związanych z konstrukcją bomby atomowej i wodorowej, a także elektronicznych komputerów (w niektórych kręgach komputer nadal nazywa się „maszyną von Neumanna”). Choć zmarł w stosunkowo młodym wieku, w 1957 roku, odegrał poważną rolę w rozwoju dwudziestowiecznej nauki. Von Neumann był nieprzeciętnym matematykiem, lecz nawet geniuszowi może się przydarzyć drobna wpadka.

Wpadka dotyczyła dodawania. Gdy kolejność wykonywania pewnych operacji matematycznych nie ma wpływu na wynik, to mówi się o nich, że komutują. Dodawanie, na przykład, jest operacją komutatywną: $3 + 2$ daje tyle samo, co $2 + 3$. Jeżeli jednak kolejność jest istotna, to mówimy, że dana operacja nie komutuje. Odejmowanie jest operacją niekomutatywną: $3 - 2$ nie jest równe $2 - 3$. W świecie kwantów nawet dodawanie nie zawsze jest prostą komutatywną operacją. Na wynik serii oddziaływań na ogół ma wpływ kolejność, w jakiej one zachodzą. To trochę tak, jak przy pieczeniu ciasta - zupełnie inny wynik uzyska się po przeprowadzeniu operacji „dodać pół litra wody i piec przez pół godziny” niż „piec przez pół godziny i dodać pół litra wody”.

Nie będę zagłębiał się w szczegóły. W swoim „dowodzie” dotyczącym teorii z ukrytymi parametrami von Neumann wykorzystał fakt, że *ś r e d n i a* wartość pewnej wielkości charakteryzującej układ kwantowy spełnia reguły komutacyjne, a następnie zastosował tę regułę do pojedynczych składników układu. To tak, jakby z faktu, że średni wzrost uczniów w klasie wynosi 1,2 metra, ktoś wyciągnął wniosek, że każdy uczeń ma 1,2 metra. To oczywiście może się zdarzyć, lecz nie jest to jedyny sposób uzyskania takiej średniej (i nie najbardziej prawdopodobny). Byłoby naiwnością zakładać, że każde dziecko w klasie jest tego samego wzrostu.

Sama umiejętność obliczania średniej nie wystarczy, żeby zrozumieć pomyłkę w rozumowaniu von Neumanna, lecz mimo to powinna ona być oczywista dla kompetentnego matematyka. Grete Hermann zwróciła na nią uwagę już w 1935 roku, ale zostało to zignorowane. Wszyscy nadal wierzyli w dowód von Neumanna i dopiero w 1966 roku John Bell wykazał, że dowód zawiera tę fałszywą przesłankę. Dwadzieścia lat później Bell następująco opisał, jak bardzo zaskoczyło go odkrycie błędu von Neumanna:

Dowód von Neumanna rozpada się w rękach, gdy się za niego porządnie zabrac. On nie jest po prostu błędny, jest *ś m i e s z n y* ! [...] W kategoriach układu fizycznego [jego założenia] są nonsensem. Możecie się na mnie powołać: dowód von Neumanna nie jest po prostu fałszywy, lecz głupi!⁸²

Komentując (w 1993 roku) tę złośliwość losu, David Mermin zwrócił uwagę na całe pokolenia studentów i doktorantów, którzy być może mieli ochotę na konstruowanie teorii z ukrytymi zmiennymi, lecz powstrzymywało ich powszechne przekonanie, że von Neumann udowodnił, iż nie jest to możliwe. Mermin stwierdził, że dowód von Neumanna był oparty na tak śmiesznym

⁸² Wywiad w „Omni”, maj 1988, s. 88.

założeniu, iż „budzi poważne wątpliwości, czy dowód ten został kiedykolwiek sprawdzony albo przez samych studentów, albo przez promotorów odwołujących się do dowodu von Neumanna po to, aby uchronić studentów przed bezproduktywnym awanturnictwem” w królestwach kwantowych interpretacji⁸³.

Poświęciłem tej historii tak dużo uwagi z dwóch powodów. Po pierwsze, widać na tym przykładzie, że fizycy mogą być równie podatni jak wszyscy inni na zaakceptowanie jakiejś idei - nie zwracając sobie głowy własnoręcznym sprawdzeniem faktów - tylko dlatego, że „każdy wie”, iż jest prawdziwa, a także dlatego, że została zamieszczona w znanej książce. Po drugie, przemożny wpływ dowodu von Neumanna spowodował, że w wielu tekstach popularnonaukowych, a nawet w niektórych podręcznikach, nadal utrzymuje się, że teorie z ukrytymi parametrami są błędne, chociaż Bell już w 1966 roku udowodnił, że to dowód von Neumanna jest błędny. Oznacza to, że m o ż n a skonstruować skuteczną teorię zmiennych ukrytych, pod jednym warunkiem, do którego za chwilę przejdziemy. Warto zwrócić uwagę, że znalazł się ktoś, kto nie dał się powstrzymać przez - aby użyć przenośni - uderzenie w głowę „dowodem” von Neumanna i próbował konstruować takie teorie już w latach pięćdziesiątych. Tym kimś był David Bohm, autor interpretacji mechaniki kwantowej opartej na teorii ze zmiennymi ukrytymi, która sprawdza się równie dobrze jak interpretacja kopenhaska, lecz daje diametralnie odmienny obraz kwantowej rzeczywistości.

Niepodzielna całość

Pogląd Bohma na naturę kwantowej rzeczywistości żywo kontrastuje z wyobrażeniami Peierlsa. Zapytany, czy sądzi, że świat zewnętrzny istnieje niezależnie od naszej percepcji, Bohm powiedział: „Każdy fizyk w to wierzy [...] Wszechświat jako całość nie zależy od nas [...] sądzę, że [umysł] nie ma istotnego wpływu na zachowanie atomów”⁸⁴.

Być może odgrywa tu rolę fakt, że Bohm należy do innego pokolenia fizyków niż pionierzy teorii kwantowej. Urodził się w 1917 roku, a do systematycznej pracy nad alternatywną interpretacją przystąpił na początku lat pięćdziesiątych, 20 lat po tym, jak interpretacja kopenhaska uzyskała dominującą pozycję. Być może istotny był także fakt, że Bohm urodził się w Ameryce i wykształcił bardzo daleko od potężnego wpływu Nielsa Bohra.

Zawsze miałem słabość do Bohma, od czasów, gdy przeczytałem, że zainteresował się on nauką dzięki lekturze książek z fantastyki naukowej w wieku ośmiu lat, a następnie odkrył książki z astronomii. Niemal dokładnie tak samo było ze mną, w tym samym wieku, lecz trzydzieści lat później. Drugą wojnę światową Bohm spędził w Kalifornii, jako doktorant Roberta Oppenheimera, w pewnym niewielkim zakresie pracował nawet dla Projektu Manhattan. Po wojnie przeniósł się do Princeton, gdzie napisał książkę, w której próbował opisać teorię kwantową tak, jak jego zdaniem wyglądała z punktu widzenia Nielsa Bohra. To właśnie ta próba wytłumaczenia standardowej

⁸³ „Reviews of Modern Physics”, 65 (1993), s. 803.

⁸⁴ P. Davies, J.R. Brown (red.), *Duch w atomie*, s. 142-143.

interpretacji uświadomiła mu, że nie rozumie poglądów Bohra, i doprowadziła do sformułowania jego własnej interpretacji.

Mniej więcej w tym samym czasie, gdy jego heretyckie poglądy zaczęły się krystalizować, w jego prywatnym życiu nastąpiły zawirowania. Został wezwany przez komisję McCarthy'ego (UnAmerican Activities Committee of the House of Representatives), która interesowała się poglądami politycznymi niektórych naukowców z Berkeley, z którymi Bohm współpracował nad Projektem Manhattan. Były to pierwsze lata zimnej wojny, gdy w rządzie Stanów Zjednoczonych zaczęła się szerzyć paranoiczna obawa przed komunistyczną infiltracją i możliwością ujawnienia sekretów broni atomowej Związkowi Radzieckiemu. Bohm odmówił zeznań na temat prywatnego życia swoich kolegów, powołując się na Piątą Poprawkę do Konstytucji Stanów Zjednoczonych, która pozwala odmówić świadczenia przeciwko sobie.

W pierwszej chwili historia ta nie zrobiła na nikim wrażenia i została rychło zapomniana. Polowanie na czarownice nabierało jednak tempa i dwa lata później Bohm został oskarżony o obrazę Kongresu. Został wprawdzie formalnie uniewinniony, lecz nie zdołał oczyścić się z błota, którym obrzucono go w trakcie procesu, w początkowej fazie ery McCarthy'ego. Nie mogąc znaleźć pracy w USA, przeniósł się do Europy i został zatrudniony w Birkbeck College w Londynie. Jego interpretacja powstała w dużej części w okresie czterdziestu lat, które spędził w Birkbeck.

Jak można sądzić po jego zachowaniu w trakcie śledztwa, Bohm nie był osobą, która dałaby się zastraszyć władzy lub biernie akceptowałaby poglądy tłumu (co jest paradoksalne w świetle oskarżenia go o przynależność do partii komunistycznej). Fakt, że von Neumann stwierdził, iż teorie z ukrytymi parametrami są błędne, nie przeszkadzał Bohmowi zainteresować się tym zagadnieniem. Nie znalazł wprawdzie błędu w dowodzie von Neumanna, lecz skonstruował skuteczną teorię z ukrytymi parametrami, co oznaczało, że przynajmniej jeden z nich się pomylił. Bohm zmarł w 1992 roku, w czasie gdy teorie konkurencyjne w stosunku do interpretacji kopenhaskiej zaczęły w końcu być traktowane poważnie nie tylko przez kilku zapaleńców. Zdążył też zaznać satysfakcji, gdyż dzięki pracom Bella wyszło na jaw, kto się pomylił (odkrycie przez Bella Pomyłki von Neumanna nie dowodzi oczywiście, że teoria Bohma jest słuszna, lecz usuwa z jej drogi poważną przeszkodę).

Bohma interpretacja kwantowej nieokreśloności polega na założeniu, że cząstki zawsze mają określone położenia i pędy, lecz każda próba pomiaru tych wielkości zmienia falę pilotującą, związaną z cząstkami, i tym samym niszczy informację o cząstkach. Podglądanie fali pilotującej w określonym miejscu (na przykład przez zmierzenie położenia elektronu) natychmiast zmienia kształt fali w całym otoczeniu, wpływając na zachowanie cząstek będących pod jej wpływem.

Teoria Bohma zawiera dwie koncepcje. Po pierwsze, ponieważ o tym, w jaki sposób fala wpływa na zachowanie cząstek, decyduje jej kształt, nie ma znaczenia natężenie fali w jakimś określonym miejscu. Dopóki cząstki znajdują się w obszarze istnienia fali, dopóty wpływa ona na ich zachowanie. Po drugie, fala pilotująca reaguje natychmiast na zaburzenie w dowolnym miejscu. Cząstki mogą być dobrze zlokalizowane, ale sama fala jest nielokalna.

To jest ten warunek, o którym wspomniałem uprzednio. W 1966 roku John Bell udowodnił, że teorie z ukrytymi parametrami mogą być skuteczne, j e ż e l i z a a k c e p t u j e s i ę n i e l o k a l n o ś ć . Eksperyment Aspecta jest właśnie przykładem funkcjonowania pojęcia nielokalności - pomiar polaryzacji jednego fotonu natychmiast determinuje polaryzację drugiego, mimo że ten drugi znajduje się na drugim końcu wszechświata.

Ale przecież, powie czytelnik, eksperyment Aspecta został opisany w kategoriach interpretacji kopenhaskiej! I słusznie. Gdyby Bell odkrył, że tylko teorie z ukrytymi parametrami zmuszają nas do zaakceptowania nielokalności, to byłby to poważny argument za ich odrzuceniem. Bell odkrył jednak coś jeszcze bardziej fundamentalnego - że k a ż d a interpretacja kwantowej rzeczywistości musi opierać się na nielokalności.

Ściśle rzecz biorąc, powyższe stwierdzenie jest lekkim uproszczeniem. Bell wykazał, że jeśli jego nierówności nie są spełnione, to musimy pożegnać się z tak zwanym lokalnym realizmem. W tym kontekście przymiotnik „lokalny” oznacza zakaz komunikacji z prędkością większą od prędkości światła, natomiast „realizm” oznacza, że świat istnieje niezależnie od tego, czy go obserwujemy czy nie. Demonstrując naruszenie nierówności Bella, eksperymenty Aspecta (i późniejsze) pokazały, że musimy zrezygnować albo z lokalności, albo z realizmu. Jest to znacznie bardziej dramatyczna konkluzja, niż mogłoby się na pierwszy rzut oka wydawać, ponieważ nierówności Bella nie zależą w ogóle od mechaniki kwantowej. Jeżeli są one łamane (a tak jest w istocie), to lokalny realizm musi być odrzucony, n a w e t g d y b y s i ę o k a z a ł o , ż e m e c h a n i k a k w a n t o w a j e s t c a ł k o w i c i e b ł ę d n a . Wyniki eksperymentów Aspecta pokazują, że „lokalny realizm” nie obowiązuje n i e z a l e ż n i e od tego, jaki opis funkcjonowania wszechświata nauka stworzy. Jeżeli ktoś wierzy, że istnieje realny świat, to musi zaakceptować nielokalność. Jeżeli woli wybrać zakaz komunikacji szybszej od światła, to m u s i s i ę o b e j ś ć bez niezależnego od obserwacji wszechświata.

Bell, który urodził się w 1928 roku i zmarł w 1990, należał do jeszcze późniejszego pokolenia niż Bohm. Jeszcze trudniej było mu zrozumieć, dlaczego naukowcy traktują interpretację kopenhaską jak prawdę objawioną. Koncepcja (de Broglie'a i Bohma) cząstki oraz fali pracujących wspólnie „wydaje mi się tak naturalna i prosta, a zarazem tak skutecznie i łatwo rozwiązuje dylemat falowo-korpuskularny, że jest dla mnie wielką zagadką, dlaczego tak powszechnie się ją ignoruje”⁸⁵. Nie miał żadnych trudności z zaakceptowaniem koncepcji, zgodnie z którą oddziaływanie przenoszą się szybciej niż światło, nawet jeżeli miałyby to oznaczać (i rzeczywiście oznacza) działanie wstecz w czasie. Bell powiedział, że łatwiej byłoby mu zaakceptować odrzucenie szczególnej teorii względności Einsteina, nawet gdyby wymagało to powrotu do koncepcji eteru (lub przynajmniej do wyróżnionego układu odniesienia), niż odrzucenie pojęcia realizmu:

Chcę móc mówić o świecie tak, jakby istniał nawet wtedy, gdy nikt go nie obserwuje. Z pewnością wierzę, że świat był tu przede mną, będzie po mojej śmierci, i wierzę, że pan jest

⁸⁵ J.S. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, s. 191.

częścią tego świata! Sądzę, że prawie każdy fizyk zająłby takie stanowisko, gdyby jakiś filozof zmusił go do deklaracji⁸⁶.

Bohm rozwinął szerzej koncepcję, zgodnie z którą wszystko jest połączone ze wszystkim, oraz że wszystko reaguje (natychmiast) na coś, co dzieje się gdzie indziej, poprzez falę pilotującą. Pozornie niezależne obiekty, pozornie zajmujące się własnymi sprawami i pozornie pozbawione zewnętrznych połączeń są w istocie nieustannie pod wpływem jakiegoś ukrytego mechanizmu. Bardzo uproszczona analogia odwołuje się do tancerza, którego cień jest rzucały przez dwie lampy na przeciwległe ściany pomieszczenia. Ktoś, kto spogląda na ściany i nie widzi tancerza, może odnieść wrażenie, że poruszające się cienie oddziałują ze sobą w jakiś tajemniczy sposób związany z działaniem na odległość, podczas gdy w rzeczywistości ruch cieni jest wynikiem ich reakcji na ruch ukrytego przed wzrokiem widza tancerza. Bohm rozwinął później tę ogólną ideę i wysunął koncepcję funkcjonowania świata opartą na polu złożonym z nieskończonej liczby nakładających się na siebie fal. Nakładanie się fal powoduje lokalne efekty, które my postrzegamy jako cząstki.

Wszystkie te koncepcje, a zwłaszcza pojęcie stowarzyszonej z cząstką fali pilotującej, która jest świadoma warunków panujących w całym wszechświecie i odpowiednio do nich steruje cząstką, mają wiele wspólnych cech z sumami po historiach - podejściem do mechaniki kwantowej stworzonym przez Feynmana. Zamiast mówić, że „foton” podróżuje każdą możliwą drogą do lustra, a następnie do oka, gdzie powstaje obraz, możemy powiedzieć, że „fala pilotująca” podróżuje każdą możliwą drogą, a następnie „mówi” fotonowi, którą trasę ma wybrać. Feynman, młodszy zaledwie o rok od Bohma, również zdobywał wykształcenie daleko od kopenhaskich interpretatorów - zarówno w przestrzeni, jak i w czasie - i formułował swoje idee kilka dziesiątków lat po powstaniu tradycyjnej interpretacji. Jeszcze do niedawna koncepcje Feynmana były uważane za bardziej obiecujące od idei Bohma, ale obecnie wielu fizyków uważa je za nieco szalone, mimo że działają poprawnie. Obie te idee są zresztą koncepcyjnie powiązane z inną, jeszcze bardziej dziwną interpretacją rzeczywistości kwantowej, która odwołuje się nie tylko do nielokalności lub do fotonów poruszających się wzdłuż wszystkich możliwych trajektorii, lecz także do nieskończonej liczby *w s z e c h ś w i a t ó w* realizujących każdy możliwy rezultat każdego możliwego kwantowego wyboru w zdecydowanie nielokalny sposób (to ostatnie stwierdzenie nie zawsze jest uznawane przez zwolenników tej interpretacji).

Rozmnażanie wszechświatów

Z oczywistych powodów (jeżeli jeszcze nie są, to niebawem staną się oczywiste) interpretacja odwołująca się do nieskończonej liczby wszechświatów nosi nazwę interpretacji „wielu światów”. Od dawna była ona moim faworytem, częściowo z tego powodu, że wydawało się, iż stanowi najlepszą alternatywę dla interpretacji kopenhaskiej, do której nigdy nie byłem przekonany, a

⁸⁶ P. Davies, J.R. Brown (red.), *Duch w atomie*, s. 69.

częściowo dlatego, że daje tak wspaniałe pole do popisu dla literatury fantastycznonaukowej. W miarę pozyskiwania zwolenników jej historia się nieco skomplikowała - obecnie istnieją trzy wersje teorii wielu światów. Równocześnie pojawiła się jeszcze lepsza interpretacja - którą poznamy w epilogu - aby usatysfakcjonować sceptyków, których nie zadowalały dotychczas istniejące propozycje. Obecnie nie jestem już tak bardzo entuzjastycznie nastawiony do teorii wielu światów jak niegdyś. Jest ona jednak nadal równie dobra jak interpretacja kopenhaska i nadal stanowi żyzny grunt dla fantastyki naukowej, więc oto ona w całej swojej krasie.

Fundamentem teorii wielu światów jest założenie, że za każdym razem, gdy wszechświat musi dokonać kwantowego wyboru, cały wszechświat rozszczepia się na tyle kopii samego siebie, ile potrzeba, aby zrealizować każdy możliwy wynik. Wyobraźmy sobie to na przykładzie czcigodnego kota Schrödingera. W tym myślowym eksperymencie możliwe są tylko dwa wyniki. Albo atom się rozpada i kot ginie, albo atom się nie rozpada i kot żyje. Jak pamiętamy, konwencjonalna interpretacja kopenhaska mówi, że *ż a d n a* z tych dwóch możliwości nie staje się realna, dopóki inteligentny obserwator nie otworzy pudła i nie zajrzy do środka. Do tego momentu wszystko wewnątrz pudła znajduje się w stanie superpozycji, więc kot w jakimś sensie nie jest ani żywy, ani martwy, dopóki ktoś na niego nie spojrzy. Interpretacja wielu światów mówi, że obie możliwości stają się realne natychmiast po tym, jak układ zostaje postawiony przed wyborem, lecz wszechświat dzieli się na dwie kopie. W jednej kopii wszechświata eksperymentator otwiera pudło i znajduje żywego kota, a w drugiej eksperymentator otwiera pudło i znajduje martwego kota. Kluczowym elementem tej teorii jest oczywiście fakt, że kot był *r z e c z y w i ś c i e* albo żywy, albo martwy, jeszcze zanim pudło zostało otwarte. Nie znajdował się w tajemniczej superpozycji stanów, a w momencie otwarcia pudła nie nastąpiła redukcja funkcji falowej. Każdy obserwator sądzi, że zamieszkuje jedyny wszechświat i nie ma żadnego sposobu, aby ludzie z różnych wszechświatów mogli się ze sobą komunikować.

Teorię tę opracował w 1957 roku Hugh Everett, gdy był studentem Johna Wheelera. W owym czasie Wheeler popierał tę interpretację, lecz zapewne z nieco mniejszym entuzjazmem, niż na przykład teorię absorbera Wheelera-Feynmana, co wydaje się zrozumiałe, zważywszy na fakt, że interpretacja wielu światów jest czasami określana jako teoria Everetta-Wheelera, a nie Wheelera-Everetta, mimo że Wheeler był promotorem, a Everett studentem. Kilka lat później Wheeler zmienił zdanie, gdyż doszedł do wniosku, że interpretacja wielu światów niesie zbyt duży „ładunek metafizyczny”, aby mogła być traktowana poważnie - chociaż jej przewidywania są identyczne z przewidywaniami interpretacji kopenhaskiej w każdym wyobrażalnym teście eksperymentalnym. Jest to oczywiście kwestia gustu. Superpozycje stanów i kolapsujące funkcje falowe także niosą ładunek metafizyczny, który dla niektórych ludzi (łącznie ze mną) jest trudniejszy do przyjęcia niż idea wielu światów. Trzeba jednak przyznać, że w stwierdzeniu Wheelera coś jest.

Problem polega na tym, że w oryginalnej wersji interpretacja wielu światów wymaga nieskończonej liczby wszechświatów, z których każdy rozszczepia się na nieskończoną liczbę kolejnych wersji rzeczywistości w każdym ułamku sekundy, gdy wszystkie atomy i cząstki we

wszechświecie (wszechświatach) stają przed kwantowymi wyborami i ruszają w przyszłość każdą możliwą drogą równocześnie. Typowo ludzkim sposobem ilustracji tego rozszczepiania jest idea równoległych światów, w których Południe wygrało wojnę secesyjną albo komuniści nigdy nie doszli do władzy w Rosji i tak dalej. Jak mówiłem, jest to smakowity kąsek dla autorów książek fantastycznonaukowych i chyba rozsądna interpretacja rzeczywistości, przynajmniej na tym ludzkim poziomie. Każdy lubi spekulować, „co by było, gdyby” jakieś kluczowe wydarzenie w historii zakończyło się inaczej. Czy interpretacja ta jest równie rozsądna, skoro musimy się zgodzić, aby każde maleńkie kwantowe zdarzenie zachodziło na wszystkie możliwe sposoby? Jeżeli uznamy, że nie, że tylko poważne wypadki zmieniające historię ludzkości są przyczyną rozmnażania się wszechświatów, to wracamy do problemu podziału na świat kwantów i klasyczny świat makroskopowy i ponownie musimy się zastanawiać, czy realizacja kwantowego wyboru musi mieć na tyle poważne konsekwencje, aby mógł je zaobserwować inteligentny obserwator.

Pomimo powyższych problemów niektórzy kosmolodzy podjęli interpretację wielu światów i wydobyli ją z zapomnienia, w którym tkwiła przez trzydzieści lat, od czasów jej sformułowania przez Everetta. Powodem tego entuzjazmu jest fakt, że w teorii wielu światów nie potrzeba ani inteligentnego obserwatora, ani urządzenia pomiarowego „na zewnątrz układu”, żeby dokonać redukcji funkcji falowej i tym samym urealnić rzeczywistość. Wracamy do zagadki z „przyjacielem Wignera” - jeżeli przyjaciel Wignera zajrzy do pudła i zobaczy, czy kot jest żywy, czy martwy, lecz nie powie o tym nikomu, to on t a k ż e istnieje w superpozycji stanów, dopóki Wigner nie zapyta go o wynik. Wtedy z kolei Wigner istnieje w superpozycji stanów, dopóki inny obserwator go nie zapyta. I tak dalej - dosłownie w nieskończoność. Co zatem spowodowało, że cały wszechświat nie jest superpozycją stanów?

Wheeler próbował uzasadniać, że to nasze obecne obserwacje (lub jakiegokolwiek innego inteligentnego obserwatora) mogą w jakiś sposób zadziałać wstecz (aż do momentu wielkiego wybuchu) i spowodować redukcję funkcji falowej wszechświata (i to mówi człowiek, dla którego interpretacja wielu światów niesie zbyt duży ładunek metafizyczny, aby ją potraktować poważnie!). My jednak także należymy do układu (w tym wypadku układem jest cały wszechświat), więc argument ten jest dosyć wątpliwy. Według interpretacji kopenhaskiej - ściśle rzecz biorąc - istnienie wszechświata jako pojedynczej rzeczywistości, a nie superpozycji stanów, wymaga istnienia obserwatora n a z e w n ą t r z wszechświata, aby mógł on spowodować redukcję funkcji falowej. Z tego powodu wielu kosmologów woli teorię wielu światów zajmujących odrębne obszary czasu i przestrzeni i zbiegających się we wspólnym początku - w wielkim wybuchu. Matematyczny opis takiego wszechświata (wszechświatów) jest bardzo złożony, lecz dał już pewne pozytywne rezultaty. Niektórzy badacze, na przykład Stephen Hawking, sugerują, że chociaż różnorodność możliwych wszechświatów - w jakiś sposób istniejących obok siebie - jest nieograniczona, to najpowszechniej występujące gatunki (a zatem takie, w których mamy największą szansę się znaleźć) wyglądają bardzo podobnie do tego wszechświata, w którym naprawdę żyjemy.

W latach dziewięćdziesiątych do najbardziej przekonanych zwolenników idei wielu światów należy David Deutsch z uniwersytetu w Oksfordzie, który uważa, że jest to „najprostsza interpretacja mechaniki kwantowej”⁸⁷, i używa jednego z wariantów tej teorii, aby zademonstrować odmienną wersję wydarzeń w eksperymencie z dwoma otworami.

Jeżeli zrealizuje się doświadczenie z pojedynczymi fotonami w zwykły sposób i uzyska wzór interferencyjny, wydaje się, że naturalna interpretacja mówi, że coś przeszło przez oba otwory układu. Różne interpretacje opisują to coś w kategoriach fal prawdopodobieństwa, fal pilotujących lub fotonu istniejącego w tajemniczy sposób w dwóch (lub więcej) miejscach równocześnie. Mimo to gdy tylko popatrzymy, żeby sprawdzić, przez który otwór foton przechodzi, zawsze znajdujemy cały foton w jednym otworze (i oczywiście znika wtedy wzór interferencyjny). Deutsch zwraca uwagę, że interferencja powstaje dokładnie tak, jakby widmowy foton przechodził przez inny otwór (pod warunkiem że nie patrzymy) i interferował z naszym prawdziwym fotonem, dając w efekcie wzór interferencyjny. Zatem równie dobrze można powiedzieć, że ten inny foton nie jest „widmowy”, lecz że jest to prawdziwy foton z sąsiedniego wszechświata podążający przez układ inną drogą.

Według Deutscha, gdy w eksperymencie z dwiema szczelinami foton zostaje postawiony przed wyborem jednej z dwóch szczelin, cały wszechświat dzieli się na dwoje i w jednej wersji rzeczywistości foton wybiera jedną szczelinę, w drugiej - drugą. Następnie dwie możliwe trasy fotonu są ponownie łączone ze sobą, dzięki czemu interferują i produkują obraz interferencyjny. W ten sposób Deutsch spaja z powrotem dwie wersje rzeczywistości, które istniały oddzielnie tylko wtedy, gdy foton biegł przez układ eksperymentalny (jest to interesujące rozszerzenie pierwotnej koncepcji Everetta). Fakt, że obserwujemy interferencję, nawet gdy strzelamy pojedynczymi fotonami w układ z dwiema szczelinami, Deutsch interpretuje jako dowód, że wszystkie możliwe kwantowe rzeczywistości naprawdę w jakiś sposób istnieją „obok siebie”. Taka wersja teorii wielu światów przypomina nieco sumowanie po historiach Feynmana. Pytanie, na ile „realne” są te alternatywne rzeczywistości, pozostaje jednak otwarte.

Deutsch wymyślił eksperyment, który udzieli nam odpowiedzi na to pytanie. Zrealizowanie tego eksperymentu nie jest na razie możliwe, lecz może okazać się możliwe w ciągu kilku dziesięcioleci, jeżeli technologia komputerowa będzie nadal rozwijała się tak dynamicznie jak dotąd.

Propozycja Deutscha polega na skonstruowaniu komputerowego „mózgu”, który byłby bezpośrednio świadomy przebiegu zdarzeń na poziomie kwantowym. Eksperyment polegałby na tym, że ten supermózg obserwowałby układ kwantowy z dwoma równie prawdopodobnymi wynikami pomiaru - na przykład pomiaru polaryzacji fotonu. Jeżeli wersja Deutscha jest poprawna, to supermózg rozdzieli się na dwie kopie samego siebie i każda z kopii zarejestruje jeden z dwóch możliwych wyników eksperymentu. Zamiast jednak opisywać dokładnie to, co zaobserwował,

⁸⁷ P. Davies, J.R. Brown (red.), *Duch w atomie*, s. 104. W tym samym wywiadzie Paul Davies określił interpretację wielu światów jako „oszczędną w założeniach, natomiast kosztowną, gdy chodzi o wszechświaty”.

komputer po prostu odnotuje fakt, że zaobserwował jeden i tylko jeden wynik spośród dwóch możliwych.

Mózg zapisuje dokładnie to samo w obu równoległych światach, potwierdzając tym samym, że obserwuje tylko jedną rzeczywistość. Następnie obie rzeczywistości łączą się ponownie, generując jakiś proces interferencyjny (na przykład mieszając stany polaryzacyjne fotonu). „Jeżeli słuszna jest konwencjonalna interpretacja, to w pewnej chwili w trakcie tych rozważań [supermózgu] znikną wszystkie wszechświaty oprócz jednego”⁸⁸, gdyż funkcje falowe zredukują się w trakcie kwantowego pomiaru, i nie powstaje obraz interferencyjny. Jeżeli jednak prawdziwa jest teoria wielu światów, to interferencja powstanie nawet wtedy, gdy mózg pamięta obserwację tylko jednej pośredniej rzeczywistości. Mózg nie pamięta jednak **z a d n e j** określonej pośredniej rzeczywistości (spośród dwóch możliwych), lecz jedynie fakt, że widział tylko jeden pośredni stan kwantowy! Gdyby zanotował, **k t ó r y** spośród dwóch stanów układu zobaczył (co jest dokładnie równoważne sprawdzaniu, przez którą szczelinę foton przeszedł), to stan ten zostałby zrealizowany jako rzeczywistość i nie mógłby się połączyć z drugą rzeczywistością, aby wyprodukować obraz interferencyjny. „Wszystkie inne czynności, które wykonuje, powodują nieuchronnie, że [supermózg] musi zapomnieć wyniki swoich obserwacji”. Wynik eksperymentu - interferencja - wymaga współistnienia obu pośrednich stanów, lecz pamięć przechowuje zapis, że układ znajdował się w jednym pojedynczym stanie. Wszechświat musiał więc rozszczepić się na dwa.

Mimo ich atrakcyjnej i przekonującej prostoty (przynajmniej w sensie prostoty założeń, choć nie w sensie oszczędności wszechświatów), przed każdą wersją teorii wielu światów nadal piętrzą się trudności. Najbardziej istotna jest jeszcze bardziej dokuczliwa nielokalność - jeżeli przeprowadzimy doświadczenie z dwiema szczelinami i dopuścimy do interferencji, to możemy uważać rozszczepienie i ponowne połączenie rzeczywistości za całkiem dobrze zlokalizowane zjawisko, odbywające się w jednym miejscu laboratorium i bez żadnych konsekwencji dla reszty wszechświata. Jeżeli jednak będziemy sprawdzać, przez którą szczelinę foton przechodzi, to zapobiegniemy powstaniu interferencji, co oznacza, że wszechświat musiał rozszczepić się na dwie kopie, po jednej kopii dla każdej możliwej drogi fotonu. Być może wybór konkretnej drogi przez pojedynczy foton nie wpływa istotnie na resztę wszechświata, lecz mimo wszystko oznacza to natychmiastową zmianę kwantowego stanu całego wszechświata (wszechświatów).

Deutsch nie wydaje się tym zmartwiony, między innymi dlatego, że jego rozumienie czasu jest raczej odmienne od potocznego, w którym czas płynie z przeszłości przez teraźniejszość do przyszłości. W książce *The Fabric of Reality* Deutsch twierdzi, że nie istnieje upływ czasu, a także coś takiego jak „teraz”, nawet subiektywnie. Jeżeli czas rzeczywiście „płynie”, to, zdaniem Deutscha, musi istnieć drugi rodzaj czasu, który mierzy ruch „teraźniejszości” od jednej chwili do następnej, a także trzeci rodzaj czasu, który mierzy ruch drugiego czasu, i tak dalej (Deutsch idzie

⁸⁸ Cytaty w tej części pochodzą z: P. Davies, J.R. Brown (red.), *Duch w atomie*, s. 120 i 121.

tu za argumentami J.W. Dunne'a z lat trzydziestych). Mogą istnieć różnice między przeszłością a przyszłością - serię zdjęć ludzkiej istoty jako dziecka, dorosłej osoby i starca da się łatwo ułożyć w prawidłowej kolejności - lecz nie oznacza to jeszcze, że cokolwiek przemieszcza się od przeszłości do przyszłości. Dokonując olbrzymiego skoku w wyobraźni, Deutsch sugeruje, że nie ma zasadniczej różnicy między zdjęciami z różnych czasów a zdjęciami z różnych wszechświatów. Inaczej mówiąc, „przeszłość” i „przyszłość” są tylko szczególnymi przypadkami wielu światów Everetta.

Wyływamy na głębokie wody, których wolałbym jednak uniknąć. Nie jestem przekonany, czy teoria wielu światów w wersji Deutscha jest najlepszym sposobem zrozumienia kwantowej rzeczywistości, więc szczegółowe rozważanie konsekwencji, jakie jego koncepcje wywierają na nasze rozumienie czasu, nie wydaje mi się sensowne.

Jednym z powodów, dla których nie przekonują mnie argumenty Deutscha, jest fakt, że nadal wydaje się, iż w jego wersji teorii pomiary i obserwacje (i inteligencja) odgrywają szczególną rolę w ewolucji rzeczywistości. Jeżeli eksperyment z supermózgiem wytwarza interferencję wtedy, gdy mózg odnotowuje, że widział jedną rzeczywistość, lecz nie wyszczególnia którą, natomiast nie wytwarza interferencji wtedy, gdy mózg zapisuje, którą rzeczywistość obserwuje, to ponownie wracamy do zagadki z fotonami, które podążają dwiema drogami, gdy nie patrzymy, a jedną drogą, gdy patrzymy. Osobiście wolałbym naiwną wersję teorii Everetta, w której wszechświat wciąż rozszczepia się na wiele kopii rzeczywistości, nigdy się ze sobą nie komunikujących.

Istnieją jednak jeszcze inne wersje tej podstawowej interpretacji, o których należy wspomnieć, zanim przejdziemy do kolejnych zagadnień.

Wariacje na temat kwantowy

Od ukazania się książki *W poszukiwaniu kota Schrödingera* teoria wielu światów należała do najszybciej rozwijających się interpretacji kwantowej rzeczywistości, między innymi ze względu na wspomniane wyżej problemy kosmologiczne. W połowie lat dziewięćdziesiątych wiele dyskusji dotyczyło głównie dwóch wariantów teorii, znanych jako interpretacja „wielu umysłów” oraz „wielu historii”.

Już sama lista badaczy pracujących nad różnymi aspektami teorii wielu światów pokazuje, jakie zainteresowanie wzbudzają związane z nią problemy. Wspomniałem już Davida Deutscha z Oksfordu. Do grupy naukowców aktywnie zajmujących się tą teorią zaliczają się między innymi: Dieter Zeh i Ernst Joos (uniwersytet w Heidelbergu), Claus Keifer (Instytut Fizyki Teoretycznej w Zurychu), Jonathan Halliwell (MIT), Wojciech Żurek⁸⁹ (Los Alamos National Laboratory), Thanu Padmanabhan (Tata Institute w Bombaju), Murray Gell-Mann (Caltech), James Hartle (University of California w Santa Barbara), David Albert (Columbia University) i Barry Loewer (Rutgers University). Gdy czasopismo „Physics Today” opublikowało w październiku 1991 roku artykuł Żurka poświęcony jednemu z aspektów tej teorii, redakcja otrzymała tyle listów od czytelników, że te, które postanowiono wydrukować, zajęły (wraz z odpowiedzią Żurka) osiem stron następnego

⁸⁹ Absolwent fizyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (przyp. tłum).

numeru. Teoria wielu światów wzbudza olbrzymie zainteresowanie w świecie fizyki lat dziewięćdziesiątych!

Wspomniany artykuł Żurka dotyczył między innymi pewnego aspektu kwantowej rzeczywistości zwanego „dekoherencją”. Jest to efekt związany z ilością informacji o układzie kwantowym, jaką znamy, oraz z ilością informacji, jaka byłaby konieczna, aby całkowicie opisać stan kwantowy danego układu.

Jako przykład weźmy elektron. Stan elektronu związanego w atomie wodoru może zostać całkowicie opisany za pomocą trzech liczb odpowiadających trzem stopniom swobody (dla prostoty pomijam spin elektronu). Na podobnej zasadzie położenie balonika zawieszzonego w powietrzu wewnątrz pomieszczenia może zostać opisane za pomocą trzech liczb określających odległość balonika od dwóch ścian i podłogi. Aby opisać bardziej złożone układy, potrzeba więcej parametrów, ponieważ układy te mają więcej stopni swobody. Ogólnie mówiąc, potrzeba trzy razy więcej parametrów niż cząstek, aby określić kwantowy stan układu.

Dla zobrazowania problemu Padmanabhan posłużył się tradycyjnym przykładem kota w pudle⁹⁰. Kot o wadze jednego kilograma zawiera około 10^{26} atomów, więc nawet pomijając ruchy poszczególnych elektronów, potrzebujemy trzy razy tyle liczb, aby podać kwantowy stan kota. Nasz opis kota po prostu nie funkcjonuje na tym poziomie. Gdy mówimy: „w kącie pokoju siedzi kot”, opisowi temu odpowiada bardzo wiele stanów kwantowych.

Zwolennicy tej koncepcji mówią, że pomijanie dużej liczby stopni swobody powoduje, iż układ - w tym wypadku kot - zachowuje się jak obiekt klasyczny, a nie kwantowy. Inaczej mówiąc, zaniedbując pewne stany swobody, „zmuszamy” obiekty do klasycznego zachowania. W opinii zwolenników tej idei dotyczy to nawet eksperymentu z dwiema szczelinami. Gdy sprawdzamy, przez którą szczelinę foton przechodzi, pomijamy istnienie drugiej szczeliny i układ zaczyna zachowywać się klasycznie. Gdy pozwolimy fotonowi „widzieć” obie szczeliny, wykorzystamy całą dostępną informację o układzie i zachowa się on jak układ kwantowy.

Im więcej wewnętrznych parametrów układu pominiemy, tym bardziej klasycznie będzie się on zachowywał. Teoria ta sugeruje, że gdybyśmy potrafili zaprojektować eksperyment, w którym zostałyby zmierzone wszystkie parametry określające kota, okazałoby się, że kot zachowuje się równie kwantowo jak elektron i może istnieć jako kombinacja dwóch stanów, żywego i martwego⁹¹.

To nasza niewiedza powoduje, że przedmioty zachowują się klasycznie, a rozmiar naszej niewiedzy jest większy dla większych obiektów - złożonych z większej liczby kwantowych składników. Dla niektórych badaczy stanowi to wyraźną wskazówkę, że dekoherencja jest dobrym wytłumaczeniem faktu, iż wszechświat jako całość zachowuje się tak, jakby był układem klasycznym.

W tym momencie pojawiają się teorie wielu historii. Żurek sformułował analogię między ewolucją wszechświata i układem atomów, których część jest radioaktywna, a część stabilna. W

⁹⁰ „New Scientist”, 10 października 1992.

⁹¹ Tamże.

miarę upływu czasu radioaktywne atomy rozpadają się i przekształcają w bardziej stabilne długożyciowe izotopy. Niezależnie od tego, jakie były proporcje na początku, prędzej czy później układ będzie się składał wyłącznie ze stabilnych atomów. Mechanika kwantowa dopuszcza wiele możliwych stanów kwantowych wszechświata wyłaniającego się z wielkiego wybuchu. „Przetrwają tylko niektóre bardziej stabilne stany” - mówi Żurek. O tym, które stany przeżyją, decyduje ich wewnętrzna korelacja - spójne historie, których ewolucja jest najbardziej zbliżona do klasycznego opisu, przeżywają łatwiej niż historie z natury nieprzewidywalne. Żurek określa ten proces selekcji terminem „sito przewidywalności” i mówi, że „czyste stany wybrane przez sito przewidywalności okazują się typowymi stanami koherentnymi”⁹².

Według Padmanabhana nasz wszechświat zachowuje się w sposób klasyczny, ponieważ nie widzimy wielu innych wszechświatów - wielu innych historii (stąd pochodzi określenie „wiele historii”). Jest to podejście bardzo podobne do sumowania po historiach Feynmana, lecz z dodatkowym wymogiem: historia, którą p o s t r z e g a m y , musi być spójna. Korelacja między naszą pamięcią a zapisem przeszłych wydarzeń stanowi fundament interpretacji Żurka. Zgodnie z tą koncepcją to, co postrzegamy, nie jest funkcją falową całego wszechświata, lecz zbiorem kilku charakterystycznych cech tej gałęzi - lub nawet całej wiązki różnych gałęzi - która jest spójna z naszą pamięcią oraz ze wszystkimi zapisami przeszłych wydarzeń zawartych w opisie świata konkretnego obserwatora. Różni obserwatorzy mogą pamiętać te same zdarzenia i mogą mieć taką samą percepcję historii wszechświata, mimo że równolegle trwają inne historie, niedostępne dla tego konkretnego zbioru obserwatorów.

Pod koniec 1993 roku fizycy zajmujący się podstawami teorii kwantowej zaproponowali możliwy do wykonania eksperyment, który powinien wykazać, czy historia rzeczywiście istnieje, czy raczej jest tylko prostą sumą zawartości naszych obecnych pamięci. Jest to czasowa wersja nierówności Bella. Niektórzy fizycy sugerują, że można przekształcić opis Bella, w którym rozdzielone przestrzennie zdarzenia zachodzą w tym samym momencie czasowym, aby stworzyć układ kwantowy, w którym dwa zdarzenia zachodzą w tym samym miejscu w przestrzeni, lecz są rozdzielone w czasie. Juan Paz z Los Alamos National Laboratory w Nowym Meksyku i Gunter Mahler z Santa Fe Institute (również w Nowym Meksyku) pokazali, w jaki sposób można przekształcić tę ideę w wykonalny eksperyment, który mógłby nam powiedzieć, czy historia rzeczywiście istnieje w zdroworozsądkowym sensie.

Proponowany przez nich eksperyment polega na serii kontrolowanych pomiarów wykonanych na identycznie przygotowanych układach. Idealnymi kandydatami byłyby jony berylu - które były już używane w podobnych eksperymentach, na przykład w kwantowym efekcie Zenona wspomnianym w rozdziale trzecim - ze względu na sprzyjający układ elektronowych poziomów energetycznych. Tym razem jednak elektrony związane z jonami berylu przeskakiwałyby między c z t e r e m a różnymi poziomami energii. Za pomocą wiązek lasera jony byłyby przygotowane

⁹² „Physics Today”, kwiecień 1993.

w taki sposób, aby wymusić ciągłą oscylację elektronu między dwoma spośród czterech wybranych poziomów energii, a następnie wzbudzić przeskok z każdego z tych dwóch poziomów do jednego z dwóch wyżej leżących poziomów. Czasowa nierówność Bella przewiduje, że liczba elektronów, które trafią na jeden z tych wyżej położonych poziomów, zależy w pewien określony sposób od kolejności wymuszania różnych możliwych przejść.

Eksperyment ten jest wykonalny. Paz i Mahler pokazali, że pomiary końcowego stanu układu mogą ujawnić, w jaki sposób układ osiągnął ten stan. Zdrowy rozsądek mówi, że musi istnieć ciągła historia, w trakcie której elektrony przeszły od stanu początkowego przez dobrze określony ciąg stanów pośrednich aż do stanu końcowego. Podobnie jak Bell sformułował swoje równania w taki sposób, że zgadzają się ze zdrowym rozsądkiem (czyli naruszenie nierówności Bella dowodzi, że rzeczywiście istnieje „widmowe oddziaływanie na odległość”), odpowiednie równania opisujące powyższy eksperyment są sformułowane zgodnie ze zdrowym rozsądkiem. Jeżeli wynik eksperymentu będzie zgodny z czasową nierównością Bella, to okaże się, że światem kwantów rządzi zdrowy rozsądek. Jeżeli jednak okaże się, że czasowa nierówność Bella nie jest spełniona, to oznacza, że nie ma dobrze określonych stanów pośrednich, czyli -jak mówią Paz i Mahler - „pomiędzy faktycznymi zdarzeniami (określonymi, zgodnie z wolą eksperymentatora, przez przygotowanie układu w stanie początkowym, a następnie przez pomiar stanu końcowego) historie nie są elementem rzeczywistości”⁹³.

Analogicznie do przestrzennego testu Bella, jeżeli nierówność nie jest spełniona, to zdarzenia kwantowe są skorelowane w czasie (od stanu początkowego do końcowego), lecz nie przechodzą przez żadne stany pośrednie (nie mają czasowej trajektorii). Eksperyment Aspecta pokazuje, że obiekty kwantowe zachowują się tak, jakby nie istniała między nimi przestrzeń. Eksperyment proponowany przez Paza i Mahlera pokaże (chyba że wszystko, co wiemy o świecie kwantów, jest nieprawdą) były kwantowe zachowujące się tak, jakby czas między nimi nie istniał.

Po tym, czego się już dowiedzieliśmy, nie powinno nas dziwić, że fizycy s p o d z i e w a j ą s i ę, iż nierówność nie będzie spełniona, gdy eksperyment zostanie wykonany. Technicznie eksperyment jest tak podobny do doświadczenia z czajnikiem kwantowym, że całkiem niewykluczone, iż zostanie on zrealizowany, zanim ta książka dotrze do rąk czytelnika. Tak czy owak jestem przekonany, że wynik będzie zgodny z przewidywaniami fizyki kwantowej, a nie zdrowego rozsądku.

Wbrew pozorom nie jest to aż tak niepokojące, jak się na pierwszy rzut oka wydaje, ponieważ o wyniku eksperymentu decydują właściwości czystego stanu kwantowego. Gdy układ (na przykład istota ludzka albo kot) zawiera wiele kwantowych cząstek, to - jeżeli koncepcja dekoherencji jest słuszna - kwantowość układu może ulec zamazaniu. Według słów Paza i Mahlera „naruszenie czasowej nierówności Bella może zniknąć, jeżeli wzrośnie siła oddziaływania z otoczeniem”⁹⁴, a historia może się okazać realna dla historyków, nawet jeżeli nie jest realna dla elektronów.

⁹³ „Physical Review Letters”, 71 (1993), s. 3235.

⁹⁴ Tamże.

Jak zwykle w fizyce kwantowej istnieją jednak inne interpretacje. Jedna ze szkół twierdzi, że wprawdzie historycy (wraz z resztą ludzkości) mogą pamiętać spójną historię, lecz nie oznacza to bynajmniej, że rzeczywiście była jedna historia. Tak zwana teoria wielu umysłów, która powstała w dużej mierze w wyniku pracy Davida Alberta, łączy umysł w oddziaływania ze światem kwantów. Gdy inteligentna istota oddziałuje z układem kwantowym, struktura układu wywiera wpływ na strukturę jej mózgu. Podobnie jak superkomputer Deutscha mózg rozszczepia się na tyle stanów, ile potrzeba, aby zobaczyć wszystkie możliwe kwantowe rezultaty, ale każda pojedyncza świadomość obserwuje tylko jeden wynik eksperymentu. Gdyby ktoś faktycznie zrealizował eksperyment z kotem w pudle i otworzył pokrywę, zobaczyłby - według Alberta - oba możliwe rezultaty i oba zostałyby zarejestrowane jako realne przez jego mózg. Dwa wcielenia jego umysłu nigdy nie mogłyby jednak przekazać sobie nawzajem swoich doznań i opinii na temat wyników eksperymentu.

Nie potrafimy potraktować tych idei całkiem serio. Po pierwsze, do kwantowej debaty ponownie włączone zostają świadomość i inteligencja. Po drugie, podważają one jedną z podstawowych koncepcji teorii kwantowej - probabilistyczną naturę zjawisk kwantowych. Jeżeli k a ż d a możliwość jest obserwowana przez jedno z wcieleń mojego umysłu, to w jaki sposób prawdopodobieństwo jednego zdarzenia może być większe od prawdopodobieństwa drugiego? Gdybyśmy potraktowali te koncepcje poważnie, to znaleźlibyśmy się w obszarze rozpaczliwych prób ratowania sytuacji. Ale wciąż jeszcze nie poznaliśmy wszystkich proponowanych interpretacji kwantowych. Wspomnimy jeszcze parę, a następnie zadamy sobie pytanie, czy jakkolwiek model rzeczywistości powinien być potraktowany poważnie.

Rozpaczliwe próby

Jeżeli ktoś poszukuje nieortodoksyjnych rozwiązań, polecam Rogera Penrose'a. W *Nowym umyśle cesarza* Penrose zadaje rozsądne pytanie (s. 256): „Czy wykonanie «pomiaru» r z e c z y w i ś c i e wymaga obecności świadomego obserwatora?” i sam sobie udziela rozsądnej odpowiedzi: „Wydaje mi się, że tylko niewielka mniejszość fizyków zajmujących się teorią kwantów zgodziłaby się z takim poglądem”. Następnie Penrose rozwija własną wersję interpretacji kwantów, zakładając, że cząstka (na przykład elektron) jest w rzeczywistości rozmyta w przestrzeni, a nie skoncentrowana w jednym punkcie. Ludzie wyobrażają sobie, że rozmyte w przestrzeni jest „prawdopodobieństwo”, a nie sam elektron, lecz w doświadczeniu z dwiema szczelinami (s. 284) „musimy pogodzić się z faktem, że cząstka «jest» w dwóch miejscach równocześnie. Zgodnie z takim stanowiskiem c z ą s t k a r z e c z y w i ś c i e p r z e s z ł a r ó w n o c z e ś n i e p r z e z o b i e s z c z e l i n y ”. Penrose dochodzi do następującej konkluzji (s. 333): „Według mnie rozwiązanie problemów teorii kwantów wymaga znalezienia lepszej teorii”, i zwraca szczególną uwagę na zagadkę nielokalności.

Nielokalność stanowi zmorę większości innych rozsądnych interpretacji teorii kwantowej. Jedno z rozwiązań polega na założeniu, że nie próbujemy opisywać pojedynczego procesu kwantowego, takiego jak przejście pojedynczego fotonu przez układ dwóch szczelin. Zakładamy, że mechanika

kwantowa jest teorią czysto statystyczną, która opisuje tylko to, co się dzieje, gdy mamy do czynienia z dużą liczbą (zespołem) tego rodzaju pomiarów. Interpretacja w kategoriach zespołu pozwala pytać tylko o wyniki obserwacji tysiąca (powiedzmy) radioaktywnych atomów. Po upływie czasu połowicznego rozpadu uzyskamy (prawidłową) odpowiedź, że połowa z nich się rozpadła, a połowa nie, lecz nawet nie wolno nam zadać pytania o los pojedynczego atomu.

Podejście to mogło się wydawać rozsądne kilkadziesiąt lat temu, gdy fizycy mogli eksperymentować wyłącznie z dużymi liczbami obiektów kwantowych, lecz dzisiaj - w świetle doświadczeń z pojedynczymi fotonami, które wydają się biec równocześnie wszystkimi drogami i interferować same z sobą - robi ono wrażenie nieco prostodusznego. Niemniej podejście to jest popierane między innymi przez Johna Taylora z King's College w Londynie, który mówi, że „żadna inna interpretacja nie może tego zadowalająco wyjaśnić”, a w szczególności „teoria wielu światów wydaje mi się bardzo dziwaczna. Nie, przepraszam, ale ja jestem trzeźwym, stąpającym twardo po ziemi fizykiem. Skoro nie mamy pojęcia, co dzieje się w tych innych wszechświatach, to nie powinniśmy wprowadzać ich do teorii”⁹⁵.

Jeszcze bardziej desperacką (moim zdaniem) próbą rozwikłania kwantowych tajemnic jest podejście zapoczątkowane przez Johna von Neumanna w latach trzydziestych, zgodnie z którym w kwantowym świecie nie obowiązuje zwykła logika. Zwykła logika jest określana mianem logiki Boole'a, od nazwiska irlandzkiego matematyka George'a Boole'a (1815-1864), który pierwszy użył symbolicznego języka i symbolicznej notacji do opisu czysto logicznych procesów. Z idei tych rozwinęła się logika matematyczna, w której terminy takie jak „i” oraz „albo” są reprezentowane przez symbole matematyczne, a argumenty logiczne mogą być zapisane w postaci równań matematycznych. Zgodnie z podejściem określanym jako „logika kwantowa”, określenia „i” oraz „albo” mają w świecie kwantów inne znaczenia od tych, które przypisuje im klasyczna logika, więc wybór jednej z dwóch szczelin ma z punktu widzenia fotonu całkiem inny logiczny sens. Nie umiem skomentować tego lepiej, niż zrobił to Heinz Pagels, opisując reakcję osoby o mózgu zaprogramowanym zgodnie z regułami kwantowej logiki na zagadki kwantowego świata:

Jeżeli powiemy mu o eksperymencie z dwiema szczelinami, to po prostu się roześmieje - nie ma pojęcia, co w tym widzimy szczególnego. Cały kłopot z kwantową logiką bierze się stąd, że jest ona bardziej restryktywna niż zwykła logika Boole'a - za jej pomocą znacznie mniej da się udowodnić - więc nie czuje się dziwności fizycznego świata. Stosowanie kwantowej logiki przypomina konstruowanie nowej teorii po to, żeby wykazać, że Ziemia jest płaska - w obliczu faktów świadczących o tym, że jest kulista⁹⁶.

Znacznie bardziej intrygujący jest pomysł Johna Bella, zgodnie z którym nie ma różnicy między teorią fali pilotującej a teorią Everetta. Istotę pierwotnej koncepcji Everetta stanowiło założenie, że

⁹⁵ P. Davies, J.R. Brown (red.), *Duch w atomie*, s. 132 i 137.

⁹⁶ H. Pagels, *The Cosmic Code*, s. 180.

każdy obserwator jest określony przez kwantowy „stan pamięci”, w której przechowuje on mniej więcej spójną historię. Idea wielu rzeczywistości rozszczepiających się na wiele równoległych światów pojawiła się później i, zdaniem Bella, była nieudanym i niepotrzebnym dodatkiem. Istotnym elementem teorii Everetta jest założenie, że nie mamy dostępu do przeszłości, lecz jedynie do wspomnień, które są częścią chwilowego (a zatem nielokalnego!) kwantowego stanu wszechświata.

Jak mówi Bell, „mnożenie wszechświatów jest ekstrawagancją i może być odrzucone bez żadnych konsekwencji”, przy zachowaniu koncepcji *p o t e n c j a l n e j* mnogości rzeczywistości opisanej przez funkcję falową. To tak, jakby fala pilotująca nigdy nie była zlokalizowana (zredukowana), mimo że tylko jeden zespół parametrów związanych z falą jest realizowany w każdym momencie czasu. Wymóg, aby każdy wszechświat był realny, zdaniem Bella, przypomina żądanie, aby w każdym punkcie przestrzeni znajdowała się naładowana elektrycznie cząstka, jeżeli tylko jest tam pole elektromagnetyczne. Bell podkreśla, że w interpretacji Everetta rzeczywistość opisana jest jako rozkład wszystkich możliwych rozwiązań równania falowego, bez dobierania różnych konfiguracji. Bez dobierania nie ma bowiem upływu czasu (ten temat podjął Deutsch), „nie ma powiązania między jakąkolwiek realizacją teraźniejszości a jakąkolwiek realizacją przeszłości”, a także:

Struktura funkcji falowej w zasadzie nie jest drzewiasta. Nie łączy ona konkretnej gałęzi w chwili obecnej z jakąkolwiek gałęzią w przeszłości w większym stopniu niż z jakąkolwiek gałęzią w przyszłości. Co więcej, rozsądne wydaje się założenie, że łączenie się pierwotnie różnych gałęzi oraz wynikające z tego efekty interferencyjne są charakterystyczną właściwością mechaniki kwantowej. W tym sensie prawidłowym niedrzewopodobnym obrazem byłaby suma po wszystkich możliwych historiach Feynmana.

Bell nie wypowiadał się z pozycji zwolennika teorii wielu światów, a jedynie starał się możliwie jasno ją przedstawić. Zwraca on uwagę, że „zastąpienie (u Everetta) przeszłości przez pamięć stanowi radykalną formę solipsyzmu - rozszerzenie na wymiar czasowy eliminacji zewnętrznego świata i zastąpienie go przez moje wrażenia [...] gdyby potraktować taką teorię poważnie, to trudno byłoby cokolwiek traktować poważnie”. Jednak nawet Bell nie potrafił całkowicie odrzucić tej teorii. W dalszej części tej samej książki (s. 194) Bell mówi: „Mógłbym nieomal odrzucić ją jako głupawą, lecz [...] może ona mieć coś istotnego do powiedzenia na temat zagadki Einsteina-Podolsky'ego-Rosena. Myślę, że warto byłoby sformułować jakąś ścisłą wersję, żeby się przekonać, czy tak jest istotnie”. To brzmi niemal jak poparcie interpretacji wielu światów, zwłaszcza z ust kogoś, kto (na tej samej stronie) mówi: „nigdy do końca nie zrozumiałem komplementarności i nadal niepokoją mnie sprzeczności”, a także nie obawia się odrzucić argumentów von Neumanna przeciwko teoriiom ukrytych parametrów jako „śmiesznych”. Bell naprawdę poparł tylko koncepcję fali pilotującej, poprawną pojęciowo i na swój sposób prostą. W teorii tej szczególnie ostro uwydatnia się

jednak zasadnicza nielokalność kwantowego świata, podkreślając problem, który każda w pełni satysfakcjonująca teoria będzie musiała rozwiązać.

Do teorii wielu światów - widzianej z nieco innej perspektywy - powróciłem z dwóch powodów. Po pierwsze, nadal jest to mój faworyt wśród tradycyjnych interpretacji teorii kwantowej. Gdybym musiał wybrać jedną z dotychczas przedstawionych idei, to postawiłbym na wiele światów. Po drugie, sposób, w jaki Bell przedstawia, co się dzieje w wersji wielu światów (a także do pewnego stopnia próby rozwijania tych koncepcji przez Deutscha), wyraźnie uwydatnia rolę czasu w naszym rozumieniu kwantowego świata. W intymnym związku czasu i kwantowej rzeczywistości kryje się coś bardzo skomplikowanego - być może to tu leży klucz do pogodzenia równań mechaniki kwantowej z naszą percepcją rzeczywistości.

Analiza roli czasu doprowadziła do sformułowania całkowicie odmiennego podejścia do problemu kwantowych zagadek, podejścia, które wychodzi od praw klasycznego świata i stąd próbuje dotrzeć do jakiejś kwantowej prawdy. Zanim jednak zajmiemy się tymi nowymi pomysłami, warto poczynić małą dygresję i przyrzeć się związkom między mechaniką kwantową a teorią względności. Każdy rzeczywiście poprawny opis funkcjonowania wszechświata (ta poszukiwana „teoria wszystkiego”) będzie oczywiście musiał połączyć te dwie wielkie teorie w jedną spójną całość. Chciałbym jednak przyrzeć się im z nieco innego punktu widzenia - dotrzeć tam, gdzie te dwie teorie wydają się niekompatybilne, a przynajmniej tam, gdzie teoria kwantowa wydaje się niekompatybilna ze s z c z e g ó l n ą teorią względności.

Relatywistyczne uwagi na marginesie

Także i tym razem problem został przedstawiony niezwykle klarownie przez Bella. Kluczowym elementem szczególnej teorii względności jest założenie, że wszechświat i prawa fizyki powinny być takie same z punktu widzenia wszystkich obserwatorów niezależnie od ich ruchu (pamiętajmy jednak, że w szczególnej teorii względności mamy do czynienia tylko z jednostajnymi prędkościami, bez przyspieszeń). Zasada ta jest znana jako niezmienniczość Lorentza, aczkolwiek, jak się przekonaliśmy w rozdziale drugim, nie tylko Lorentz zajmował się przed Einsteinem tymi zagadnieniami. Eksperyment Aspecta mówi nam, że musimy się rozstać z lokalnym realizmem - albo wszechświat wokół nas nie jest realny, albo istnieje jakaś forma komunikacji szybsza niż światło, „widmowe działanie na odległość” Einsteina. Bell zasugerował, że „najtańszym” rozwiązaniem zagadki byłby powrót do teorii względności w takiej wersji, jaka istniała przed Einsteinem, gdy Lorentz i inni badacze opierali się na założeniu istnienia eteru⁹⁷.

Zgodnie z tą koncepcją wyróżniony układ odniesienia rzeczywiście istnieje, lecz nasze przyrządy pomiarowe są wskutek swego ruchu zniekształcone dokładnie w takim stopniu, aby uniemożliwić wykrycie

*

198

⁹⁷ P. Davies, J.R. Brown (red.), *Duch w atomie*, s. 67 i n.

ruchu poprzez eter (lub względem niego). Zaletą tego punktu widzenia jest fakt, że wprowadzie w tym wyróżnionym układzie odniesienia obiekty mogą poruszać się szybciej niż światło, lecz w innych układach - gdzie wydaje się, iż oddziaływania poruszają się zarówno szybciej niż światło, jak i wstecz w czasie - jest to pewnego rodzaju złudzenie optyczne. Jeżeli istnieje wyróżniony układ odniesienia, to zegary tykają w nim z wyróżnioną częstością - za jednym zamachem zostaje przywrócona absolutna przestrzeń i absolutny czas. Tylko w wersji Einsteina - gdzie wszystkie układy odniesienia są sobie równoważne - poruszanie się z prędkością większą niż światło oznacza zarazem rzeczywisty ruch wstecz w czasie.

Bell sformułował te idee w publikacji, która stała się później rozdziałem dziewiątym *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Pokazał w niej, w jaki sposób predeinsteinowska koncepcja wyróżnionego układu odniesienia, połączona z doświadczalnym faktem, że nie wykrywamy ruchu względem tego układu, prowadzi do zwykłej formy przekształcenia Lorentza, przez co (s. 77) „nie da się eksperymentalnie określić, który z dwóch (a może żaden) poruszających się jednostajnie układów jest rzeczywiście nieruchomy, a który się porusza”. Bell zwraca uwagę, że teoria Einsteina różni się od wersji Lorentza pod względem filozoficznym, a także pod względem stylu. Różnica filozoficzna polega na tym, że, ponieważ nie można powiedzieć, który z dwóch poruszających się względem siebie układów znajduje się w absolutnym spoczynku, a który się porusza, określenia „absolutny spoczynek” i „absolutny ruch” nie mają fizycznego znaczenia. Istotny jest jedynie ruch względny. Różnica stylu wynika z odmiennych założeń. Einstein stawia hipotezę, że prawa fizyki są takie same dla wszystkich inercjalnych obserwatorów, a następnie wyprowadza z niej w prosty i elegancki sposób przekształcenie Lorentza, zamiast zaczynać od dowodów eksperymentalnych i podążać nieco dłuższą drogą do tego samego celu. Podobnie jak interpretacja kopenhaska i teoria wielu światów dają te same „odpowiedzi” na pytania teorii kwantów, również wersja Lorentza oraz szczególna teoria względności Einsteina dają te same „odpowiedzi” we wszystkich fizycznych sytuacjach. Różnią się one jednak pod względem interpretacji tego, co się dzieje.

Propozycja Bella jest albo rewolucyjna, albo reakcyjna, zależnie od punktu widzenia. Z pewnością nie podziela jej większość fizyków. Z właściwą sobie przekorą Bell zwrócił uwagę, że istnieje przynajmniej jedno wyjście z sytuacji nie wymagające powrotu do predeinsteinowskiej teorii względności. „Wie pan - powiedział Paulowi Daviesowi - problem przyczynowości można także wyjaśnić, zakładając, że świat jest superdeterministyczny”⁹⁸. Innymi słowy, absolutnie wszystko jest z góry zdeterminowane, łącznie z decyzją eksperymentatora co do wyboru rodzaju pomiarów w doświadczeniu Aspecta. Jeżeli wolna wola jest całkowitą iluzją, to problem znika. Jeżeli jednak mielibyśmy poważnie potraktować taką wersję teorii.

Sugestia, że szczególna teoria względności mogłaby nie być najlepszym sposobem widzenia świata, w zasadzie nie powinna zbytnio szokować, zważywszy, że sama jej nazwa implikuje pewną

⁹⁸ P. Davies, J.R. Brown (red.), *Duch w atomie*, s. 65.

pro wizoryczność. Jest niepełna, gdyż w odróżnieniu od ogólnej teorii nie uwzględnia ruchu przyspieszonego i grawitacji.

Obiecałem wprawdzie nie wdawać się w szczegóły związane z ogólną teorią względności, lecz w ramach tej dygresji pozwolę sobie złamać obietnicę i wspomnieć kilka charakterystycznych cech tej teorii. W ogólnej teorii względności grawitacja opisana jest w kategoriach zakrzywienia czasoprzestrzeni. Zamiast jakiegoś tajemniczego działania na odległość (zwanego grawitacją) sięgającego od Słońca i utrzymującego Ziemię na orbicie, musimy wyobrazić sobie, że Słońce powoduje zagłębienie w czasoprzestrzeni, podobnie jak kula bilardowa wywołałaby zagłębienie na naciągniętej powłoce gumowej. Poruszając się po linii najmniejszego oporu, Ziemia krąży wokół Słońca, podobnie jak mała kulka poruszałaby się wokół zagłębienia utworzonego w gumowej powłoce przez kulę bilardową.

Grawitacyjny wpływ Słońca (i wszystkich innych ciał) rozciąga się w zasadzie na cały wszechświat, aczkolwiek wywołane przez niego zakrzywienie staje się tym mniejsze, im bardziej oddalamy się od Słońca. Zmiany grawitacyjnego zakrzywienia przestrzeni mogą być spowodowane przez ruchy mas w czasoprzestrzeni. Podobnie jak wibracje na powierzchni napiętej gumowej powłoki spowodowane przez podskoki kuli bilardowej, ruchy mas są źródłem zaburzeń zakrzywienia czasoprzestrzeni, które rozchodzą się z prędkością światła. Są to fale grawitacyjne przewidziane przez ogólną teorię względności Einsteina i potwierdzone ostatnio dzięki obserwacjom układu zwanego podwójnym pulsarem. Tworzące ten układ dwie masywne gwiazdy krążą wokół siebie i tracą tak dużą część energii w formie promieniowania grawitacyjnego, że okres ich obiegu ulega mierzalnym zmianom. Odkrycie to zostało uznane za tak ważne, że dwaj badacze, którzy go dokonali, Russell Hulse i Joe Taylor, otrzymali w 1993 roku Nagrodę Nobla.

Promieniowanie grawitacyjne porusza się wprawdzie z prędkością światła, lecz oddziaływanie grawitacyjne danego obiektu w pewnym sensie wydaje się nielokalne. Zgodnie z powszechnie przyjętym poglądem pole grawitacyjne rozciąga się wszędzie w przestrzeni przez cały „czas” (wszędzie w czasoprzestrzeni). Wiąże się z tym pewien problem, który trapił uczonych przez wiele dziesięcioleci i nadal pozostaje nie rozwiązany - inercja. W próżni, gdzie nie ma tarcia, ruch jest wieczny - jeżeli popchnie się jakieś ciało, to będzie się ono poruszać w kierunku, w którym zostało popchnięte, tak długo, aż ponownie zostanie popchnięte. Aby przyspieszyć, spowolnić bądź zmienić kierunek ruchu ciała, potrzeba energii. Jest to na tyle istotne, że niezmiennicze ze względu na transformację Lorentza układy odniesienia obserwatorów poruszających się ze stałą prędkością są często określane po prostu jako „układy inercjalne”. Skąd jednak dane ciało „wie”, że jego ruch się zmienia (lub nie)? W jaki sposób mierzy swoją bezwładność?

W niemal pustym wszechświecie zawierającym tylko jedną cząstkę ruch byłby pojęciem pozbawionym znaczenia, gdyż nie byłoby punktu odniesienia, względem którego cząstka mogłaby mierzyć swój ruch. Trudno w takiej sytuacji rozważać lub wyobrażać sobie jej inercję. Jednak gdy we wszechświecie pojawi się druga cząstka, wraz z nią pojawia się także punkt odniesienia. Czy jej pojawienie się spowoduje ' także „włączenie” pełnej inercji pierwszej cząstki? Czy może inercja

będzie wzrastać stopniowo wraz ze wzrostem liczby cząstek we wszechświecie? Nikt tego nie wie. W znanym nam wszechświecie zachowanie ciał - ich bezwładność oraz ich reakcja na popychanie - wydaje się wskazywać, że „mierzą” one swoją prędkość względem uśrednionego położenia całej materii wszechświata.

Powyższy problem znany jest jako „zasada Macha”, od nazwiska austriackiego fizyka, Ernsta Macha (1838-1916); wywarła ona poważny wpływ na Einsteina w okresie, gdy pracował nad ogólną teorią względności. Jak na ironię, ogólna teoria względności nie wyjaśnia problemu Macha. Co więcej, Mach nie należał do zwolenników teorii Einsteina, chociaż przyczynił się do jej powstania. Zagadka pozostaje zagadką. W jaki sposób popchnięte ciało natychmiast wie, jaki efekt popchnięcie to wywrze na jego ruch względem całej materii we wszechświecie? Wróciliśmy do „widmowego działania na odległość”, ale tym razem nie w teorii kwantowej, lecz w kontekście samego arcydzieła Einsteina - ogólnej teorii względności!

Szczególna teoria względności, która nie dopuszcza komunikacji z prędkością większą od prędkości światła, nie jest całościową teorią wszechświata. Jak pokazał Bell, z praktycznego punktu widzenia jest ona równoważna teorii Lorentza, w której komunikacja taka jest dopuszczalna. Wydaje się jednak, że nielokalność jest wbudowana w strukturę ogólnej teorii względności, która jest znacznie bardziej całościową teorią. Czytelnik z pewnością zauważył, że konsekwencją zasady Macha byłoby istnienie wyróżnionego układu odniesienia we wszechświecie, niezależnie od tego, czy eter istnieje w materialnej postaci czy nie.

Wiemy, że wszechświat się rozszerza i że w wyróżnionym układzie odniesienia, określonym przez średni rozkład materii we wszechświecie, proces ten zachodzi idealnie jednorodnie we wszystkich kierunkach. Wiemy również, że wszechświat powstał w wielkim wybuchu - gorącej kuli ognia, która wypełniła przestrzeń promieniowaniem elektromagnetycznym. Promieniowanie to uległo od tego czasu tak znacznemu ochłodzeniu, że obecnie istnieje w postaci słabego szumu w zakresie mikrofalowym, o temperaturze nieco niższej od 3K (czyli nieco niższej od -270°C), wypełniającego równomiernie cały wszechświat. Jest to słynne reliktove promieniowanie mikrofalowe tła. Obserwator znajduje się w spoczynku względem wyróżnionego układu odniesienia, jeżeli nie porusza się względem kosmicznego promieniowania tła. Samo światło (w tym sensie, w jakim na wszelkie promieniowanie elektromagnetyczne można mówić „światło”) daje nam wyróżniony układ odniesienia.

Zagadka staje się nieco mniej skomplikowana. Wrócimy do tych kwestii nieco później. Najpierw zajmiemy się jednak tymi nowymi sposobami patrzenia na stare zagadki mechaniki kwantowej.

Doświadczenie z czasem

Natura czasu jest kluczem do zrozumienia świata. W fizyce kwantowej nieokreślony stan wszechświata jest superpozycją wszystkich możliwych stanów i fizyka musi uwzględnić (w zasadzie) w s z y s t k i e te stany. W nowoczesnej wersji teorii wielu światów, stworzonej przez Deutscha i kilku innych badaczy, nie mamy do czynienia z rozgałęzianiem się wszechświatów, ponieważ wszystkie możliwości istnieją równocześnie - istnieje nieskończona liczba

wszechświatów, które „zaczynają” jako identyczne kopie. Proces kwantowego pomiaru nie powoduje rozszczepienia wszechświata, lecz w różny sposób zmienia różne wszechświaty, ponieważ wynik eksperymentu jest inny w każdym z nich - w jednym kot żyje, w sąsiednim jest martwy. W obu wszechświatach istniał jednak żywy kot przed wykonaniem eksperymentu (w istocie przez wykonaniem eksperymentu oba te wszechświaty były *nierozdzielne*). Strzałka czasu istnieje tylko w tym sensie, że niektóre stany wielu światów są bardziej złożone niż inne. Złożoność, rezultat wielu różnych pomiarów kwantowych, jest domeną przyszłości, prostota - przeszłości.

Właściwości związane ze złożonością układu (zazwyczaj opisywane w kategoriach gałęzi fizyki zwanej termodynamiką) pojawiają się wtedy, gdy mamy do czynienia z układem wielu cząstek, które mogą ze sobą oddziaływać. W tym kontekście pojawia się również strzałka czasu. W klasycznym przykładzie spadająca ze stołu szklanka rozbija się na skutek uderzenia, a energia upadku rozprasza się w formie nieznacznego podgrzania podłogi. Nigdy nie obserwujemy podłogi oddającej energię kawałkom szkła, które dzięki temu skleją się z powrotem w szklankę i szklanka wskakuje na stół, a wszystko to kosztem nieznacznego oziębienia podłogi, mimo że na poziomie atomów i cząsteczek równania dynamiki (zarówno Newtona, jak i kwantowe) opisujące ten proces mogą „biec” równie dobrze w obu kierunkach.

Złożoność, strzałka czasu, a także wyłanianie się porządku z chaosu to problemy, którymi zajmował się Ilya Prigogine. Urodził się on w 1917 roku w Rosji, lecz od dwunastego roku życia mieszkał w Belgii. W 1977 roku zdobył Nagrodę Nobla w dziedzinie chemii i od tego czasu w znacznej mierze poświęcił się konstruowaniu nowej interpretacji funkcjonowania wszechświata. Prigogine stworzył matematyczne modele układów nierównowagowych. Jego prace mają bezpośredni związek z pochodzeniem i początkami życia, a być może także z zagadką kwantowego pomiaru.

Istotą rozumowania Prigogine'a jest założenie, że eksperymentalnie zweryfikowane prawa termodynamiki, oparte na zachowaniu złożonych układów, są ściśle i dokładne, natomiast pozornie symetryczne w czasie zachowanie odbijających się od siebie małych kulek (nasze naiwne wyobrażenie atomów) jest jedynie przybliżeniem rzeczywistości. Za podstawowe należy uznać nie prawa Newtona (ani nawet równanie Schrödingera), lecz prawa termodynamiki. Gdy dany układ stosuje się ściśle do równań Newtona, mówimy, że równania te są całkowalne.

Orbita pojedynczej planety krążącej wokół samotnej gwiazdy jest całkowalna. Położenie planety może zostać obliczone w dowolnej chwili w przyszłości, a także w dowolnej chwili w przeszłości, jeżeli tylko znane są parametry orbity w jednym momencie (na przykład w tej chwili). Dołóżmy jednak do układu jeszcze jeden obiekt, tworząc układ trzech ciał, a okaże się, że równania nie są już całkowalne.

Trudność nie polega na tym, że równania stają się trudniejsze do rozwiązania, gdy opisują większą liczbę ciał; są one *nieemożliwe* do rozwiązania, nawet „w zasadzie”. Posuwając się małymi krokami, można wykonać przybliżone obliczenia położenia wszystkich trzech ciał w

pewnej chwili w przeszłości. Pracując tą metodą, zakłada się, że dwa z nich są nieruchome i wylicza się ruch trzeciego w polu grawitacyjnym dwóch pierwszych. Pozwala mu się zrobić mały krok, a następnie „zatrzymuje” się je i w ten sam sposób wylicza mały krok drugiego ciała. Następnie wykonuje się tę procedurę dla trzeciego ciała. Powtarzając ten proces wielokrotnie, można uzyskać dosyć dokładne rezultaty, zwłaszcza gdy użyje się odpowiednio wydajnego komputera, lecz nigdy nie są one absolutnie dokładne. Metoda ta bardzo dobrze sprawdza się w zastosowaniu do systemów takich jak nasz Układ Słoneczny, gdyż Słońce jest znacznie masywniejsze od planet (Słońce jest znacznie większe od wszystkich planet razem wziętych) i jego grawitacja stanowi dominujący czynnik w obliczeniach. Gdyby planety miały masy porównywalne z masą Słońca, to obliczenia, nawet przybliżone, byłyby znacznie trudniejsze. Uzyskiwalibyśmy różne „odpowiedzi” w zależności od tego, w jakiej kolejności każda planeta wykonywałaby swój ruch. Nie istnieje dokładna metoda obliczenia, jak będą zachowywać się orbity trzech ciał (nie mówiąc już o tak skomplikowanym systemie jak Układ Słoneczny) w przyszłości. Na tej samej zasadzie nie da się odgadnąć, w jaki sposób orbity te ewoluowały w przeszłości, aby dojść do stanu, w którym znajdują się obecnie.

Z takim stanem rzeczy mamy do czynienia nawet w przypadku tylko trzech ciał. A przecież kot składa się z 10^{26} cząstek! Piękne, symetryczne w czasie równania teorii kwantowej mogą dać się zastosować do dwóch lub trzech oddziałujących obiektów, lecz, zdaniem Prigogine'a, niecałkowalność stanowi fundamentalną cechę każdego złożonego układu. A gdy coś jest niecałkowalne, to nie da się prześledzić jego przeszłości, nawet w zasadzie. Rozbitej szklanki nie da się zrekonstruować, nawet jeżeli atomy podłogi konspirują, aby przekazać jej energię powstałą w wyniku schłodzenia miejsca upadku.

Podejście Prigogine'a w pewnym sensie przypomina pierwotną wersję interpretacji kopenhaskiej. Istotne w fizyce są pomiary, które wykonujemy za pomocą rzeczywistych, „klasycznych” przyrządów (na przykład licznika Geigera), natomiast to, co się dzieje wewnątrz aparatury, potrafimy zrozumieć jedynie w przybliżonych kategoriach. Jak mówi Alastair Rae:

Nie możemy doświadczyć - z definicji - odwracalnych, czysto kwantowych „zdarzeń”, które nie byłyby obserwowalne. [...] Prawa fizyki klasycznej zostały oparte na niekwestionowanym założeniu, że zawsze można rozważyć, co się zdarzyło, mimo iż zdarzenia mogą być odwracalne. Nawet teoria względności Einsteina odwołuje się wielokrotnie do sygnałów, które w oczywisty sposób są nieodwracalnymi procesami o charakterze pomiarów. Być może nie powinien być niespodzianką fakt, że gdy próbujemy konstruować scenariusz wychodzący poza rzeczywistość możliwych obserwacji i wkraczający w obszar zjawisk odwracalnych, w naszych modelach pojawiają się sprzeczności takie jak dualizm falowo-korpuskularny i przestrzenna delokalizacja obserwowana w eksperymentach EPR⁹⁹.

⁹⁹ A. Rae, *Quantum Physics*, s. 109.

Są to interesujące nowe pomysły, którym daleko do powszechnej akceptacji, lecz z pewnością będą one dyskutowane i rozwijane w ciągu najbliższej dekady. Kładzie się w nich nacisk na możliwość, że w interpretacji kopenhaskiej ważny jest moment zajścia nieodwracalnej zmiany (takiej jak na przykład śmierć kota, lecz bardziej prozaicznym przykładem byłby zapis dokonany przez urządzenie rejestrujące) we wszechświecie - w chwili, gdy pomiar decyduje o tym, w jaki sposób układ kwantowy dokona przeskoku. Wydaje mi się, że wadą tego podejścia jest brak zadowalającego wyjaśnienia nielokalności obserwowanej w eksperymentach EPR, o których mówi Rae. W podejściu Prigogine'a nie ma nawet wzmianki o nielokalności *per se*, podczas gdy nielokalność (obserwowana między innymi w doświadczeniu z dwiema szczelinami i w eksperymencie Aspecta) jest nierozdzielnie związana z kwantowymi tajemnicami. Jak stwierdził laureat Nagrody Nobla, Brian Josephson z uniwersytetu w Cambridge, doświadczalny dowód łamania nierówności Bella jest najważniejszym odkryciem fizycznym, jakiego udało się dokonać w ostatnich latach¹⁰⁰. Jakkolwiek się to przedstawi, faktem jest, że akt pomiaru wykonany na fotonie A zmienia n a t y c h m i a s t stan fotonu B, nawet jeżeli znajduje się on na drugim końcu wszechświata.

Podejście Prigogine'a nie jest wprawdzie moim ulubionym, lecz zgadzam się z jego stwierdzeniem, że kwestia odwracalności w czasie i symetrii czasowej niektórych podstawowych równań fizyki ma kluczowe znaczenie w zrozumieniu kwantowej rzeczywistości. Rae cytuje jeszcze jedną trafną uwagę Prigogine'a : „Cząstka elementarna, wbrew swojej nazwie, nie jest obiektem, który jest nam d a n y ; musimy go skonstruować”¹⁰¹.

Wszystko, co wiemy o kwantowym świecie, opiera się na wnioskach i obserwacjach obiektów codziennego świata. Fizycy mając do czynienia z modelami, liczą na to, że stanowią one przybliżenie pewnej głębszej rzeczywistości i często zapominają, że trzeba odróżniać model od opisywanej przez niego rzeczywistości. Nasz sposób patrzenia na świat kształtują również uprzedzenia i nawyki kulturowe. Aby uchwycić to, co naprawdę rozumiemy o świecie kwantów (jeżeli cokolwiek w ogóle rozumiemy), powinniśmy najpierw spróbować przeanalizować, co znaczy samo „zrozumienie”. Nie mam tutaj zamiaru wypuszczać się na głębokie wody mistycyzmu, filozofii i psychologii, lecz zanim spróbujemy ocenić rozmaite propozycje wyjaśnienia kwantowej rzeczywistości i zdecydujemy, która jest najlepsza i dlaczego, warto przyrzeć się, w możliwie najogólniejszych kategoriach, w jaki sposób myślimy o rzeczach.

¹⁰⁰ Cytowane za: P. Davies, J.R. Brown (red), *Duch w atomie*, s. 64. Brak odwołania do oryginalnego źródła.

¹⁰¹ Cytowane za: A. Rae, *Quantum Physics*, s. 109. Brak odwołania do oryginalnego źródła.

Rozdział piąty

Myślenie o myśleniu o rzeczach

Świat fizyków składa się z fotonów. Stwierdzenie to posiada dwa aspekty. Po pierwsze, wszystko wokół nas składa się z atomów. Aby zrozumieć nasze bezpośrednie otoczenie i funkcjonowanie naszego własnego ciała, nie musimy się zbytnio zastanawiać nad bardziej subtelnymi obiektami. Atom jest jednak niemal pustą przestrzenią, utrzymywaną w całości dzięki siłom elektromagnetycznym - czyli dzięki wymianie fotonów. Średnica typowego jądra atomowego wynosi około 10^{-15} m, podczas gdy średnica samego atomu wynosi około 10^{-10} m, czyli jest około stu tysięcy razy większa. Gdyby jądro miało średnicę 10cm, to zewnętrzna powłoka elektronowa znajdowałaby się w odległości całego kilometra. Zewnętrzna powłoka atomu, odpowiedzialna za oddziaływanie z innymi atomami, jest czystą elektrycznością - w postaci elektronów - utrzymywaną w miejscu przez siły elektromagnetyczne (dzięki wymianie fotonów), zgodnie z regułami QED.

Komputer, którego używam do pisania tego tekstu, robi na mnie wrażenie solidnego przedmiotu, lecz w rzeczywistości jest on jedynie siecią elektromagnetycznych sił łączących małe, silnie rozproszone obiekty kwantowe. Co zatem mam na myśli, gdy mówię, że „czuję” klawisze jako twarde przedmioty albo że „widzę” komputer jako ciągły przedmiot?

Gdy czujemy jakiś przedmiot za pośrednictwem zmysłu dotyku - uderzając palcami w klawisze komputera i odczuwając ich reakcję - w rzeczywistości czujemy oddziaływanie chmury elektronów tego przedmiotu z chmurą elektronów naszego palca. Są to takie same elektromagnetyczne oddziaływania przenoszone za pośrednictwem fotonów. Gdy patrzymy na jakiś przedmiot, to oczywiście widzimy go dzięki oddziaływaniu fotonów z atomami (a ściślej z zewnętrznymi elektronami tych atomów) naszych oczu. Gdy informacja o tym, co czujemy i widzimy (lub słyszymy, smakujemy, wąchamy), jest przesyłana do mózgu, to odbywa się to za pośrednictwem wiązki nerwów, wzdłuż której będą elektryczne impulsy. Jak się przekonaliśmy, impulsy stymulują pewne reakcje chemiczne, dzięki czemu przeskakują przez styki zwane synapsami. Reakcje chemiczne także są (kwantowymi) procesami, w których elektrony na zewnętrznych powłokach atomów oddziałują elektromagnetycznie. Również działanie naszych mózgów opiera się na takich samych procesach chemicznych - czyli sprowadza się do wymiany fotonów.

Mimo to nasze zmysły nie są w stanie odczuć kwantowego wnętrza atomu. Nie widzimy cząstek bezpośrednio ani też nie czujemy ich, nie smakujemy, nie dotykamy i nie wąchamy. Monitorujemy ich oddziaływania za pośrednictwem mniej lub bardziej skomplikowanych przyrządów, a o właściwościach cząstek wnioskujemy na podstawie odczytu wskaźników, śladów na kliszach fotograficznych lub zliczeń dokonanych przez komputer podłączony do aparatury. Nawet gdy mówimy, że da się obecnie „zobaczyć” pojedynczy atom złapany w magnetyczną pułapkę, to w rzeczywistości mamy na myśli obserwację światła odpowiedniego koloru biegnącego z odpowiedniego miejsca wewnątrz pułapki. Światło to tłumaczymy sobie w kategoriach

elektromagnetycznej aktywności obiektu zwanego atomem, o którego strukturze i właściwościach wnioskujemy na podstawie wielu eksperymentów i obserwacji wykonanych za pomocą rozmaitych przyrządów wspomagających nasze zmysły. Obiekt, który nazywamy atomem, jest w istocie jedynie teoretycznym modelem rzeczywistości. Wszystkie te rzeczy, o których mówiliśmy do tej pory - dodatnio naładowane jądro, chmura elektronów, wymiana fotonów - należą do spójnej historii, która wyjaśnia przeszłe obserwacje, a zarazem pozwala przewidywać, co stanie się w przyszłych eksperymentach. Nasz pogląd na to, czym jest atom, zmienił się kilkakrotnie w ciągu ostatnich stu lat, lecz różne jego obrazy (różne modele) są nadal użyteczne w różnych sytuacjach.

Samo słowo „atom” wywodzi się od greckiego pojęcia określającego ostateczną, niepodzielną cząstkę materii. Pod koniec dziewiętnastego stulecia pokazano jednak, że atomy nie są niepodzielne i że można oderwać od nich niewielkie kawałki (elektrony). Nieco później powstał model, który opisywał atom w kategoriach jądra i elektronów krążących wokół niego jak planety wokół Słońca. Model ten nadal funkcjonuje i bardzo dobrze tłumaczy „skoki” elektronów z jednej orbity na drugą, połączone z emisją lub absorpcją energii elektromagnetycznej oraz z powstawaniem charakterystycznych dla danego atomu (pierwiastka) linii w widmie promieniowania. Jeszcze później pojawiła się koncepcja elektronów jako fal lub chmur prawdopodobieństwa, która szybko zdobyła uznanie fizyków (ponieważ dzięki niej można wytłumaczyć dziwaczne i zagadkowe zachowanie atomów) i zastąpiła starszy model orbitalny. Nie oznacza to jednak, że atomy „rzeczywiście są” otoczone przez chmury prawdopodobieństwa elektronów ani że wszystkie inne modele są fałszywe.

Gdy fizycy zainteresowani są makroskopowymi aspektami zachowania gazu - na przykład ciśnieniem, jakie wywiera on na ściany naczynia - to w zupełności wystarcza im model gazu jako układu małych, twardych kul bilardowych. Gdy chemicy wyznaczają skład chemiczny substancji, spalając małą próbkę i analizując linie powstałego widma, to całkowicie zadowala ich rozumowanie w kategoriach modelu planetarnego, w którym elektrony krążą wokół jądra. Nick Herbert odrzuca jednak ten model w książce *Quantum Reality*:

Gdy mój syn pyta mnie, z czego świat jest zbudowany, to śmiało odpowiadam mu, że materia składa się z atomów. Gdy jednak słyszę następnie pytanie o to, czym są atomy, nie potrafię na nie odpowiedzieć, mimo że spędziłem pół życia, badając ten problem. Czuję się jak oszust, gdy - jako „ekspert” od atomów - przedstawiam dzieciom w szkole popularny obraz atomu jako układu planetarnego; już w czasach naszych dziadków wiadano, że model ten jest fałszywy¹⁰².

Czy rzeczywiście jest fałszywy? W każdym razie nie bardziej niż każdy inny model kwantowej rzeczywistości. Herbert jest zbyt surowy wobec siebie, swoich dziadków i fizyków w ogólności. Model planetarny zupełnie zadowalająco zdaje egzamin w swoich ograniczonych ramach,

¹⁰² N. Herbert, *Quantum Reality*, s. 197.

podobnie jak model kuli bilardowej w swoich. Wszystkie modele atomu są fałszywe w tym sensie, że nie stanowią jednej jedynej prawdy o atomach. I są one zarazem prawdziwe w tym sensie, że pozwalają nam uchwycić pewien aspekt atomowego świata.

Chodzi o to, iż nie tylko nie wiemy, czym atom „rzeczywiście” jest, ale także nigdy n i e b ę d z i e m y tego wiedzieć. Możemy jedynie poznać, j a k i on jest. Badając go w pewien sposób, możemy się przekonać, że w pewnych okolicznościach jest podobny do kuli bilardowej. Badając go w inny sposób, przekonujemy się, że jest podobny do Układu Słonecznego. Jeśli postawimy pytanie w jeszcze inny sposób, to okaże się, że atom jest podobny do dodatnio naładowanego jądra otoczonego przez rozmytą chmurę elektronów. Wszystko to są obrazy zapożyczone z naszego codziennego środowiska, użyte do zbudowania wyobrażenia, czym „jest” atom. Budujemy modele i obrazy, a następnie zbyt często zapominamy o tym i mylimy obraz z rzeczywistością. Gdy jakiś konkretny model zawodzi w pewnych okolicznościach, to nawet tak poważny fizyk jak Nick Herbert ulega pokusie odrzucenia go jako fałszywego.

Fizycy budują modele kwantowego świata na podstawie codziennego doświadczenia, gdyż jest to jedyne doświadczenie, do którego mogą się odwołać. Możemy powiedzieć, że atomy i cząstki subatomowe są podobne do czegoś, co już znamy. Nie miałoby sensu tłumaczenie, że atom wygląda jak kula bilardowa komuś, kto nigdy nie widział bilardu, lub porównywanie orbit elektronowych do ruchów planet dla kogoś, kto nie wie, jak funkcjonuje Układ Słoneczny.

Analogie i tworzenie modeli może nawet stać się procesem opartym na błędnym kole, na przykład gdy próbujemy wytłumaczyć sposób, w jaki atomy oddziałują ze sobą w sieci krystalicznej. Atomy w kryształach są utrzymywane na swoich miejscach w węzłach sieci przez siły elektromagnetyczne. Gdyby jeden z nich został przesunięty ze swojego miejsca, to siły elektromagnetyczne pochodzące od sąsiadujących z nim atomów wywierałyby na niego nacisk w kierunku położenia równowagi. Łatwo to sobie uzmysłowić, gdy wyobrazimy sobie, że wszystkie atomy są połączone ze swoimi sąsiadami za pomocą sprężyn. Gdy atom wysunie się ze swojego położenia, to sprężyny z jednej strony naprężą się i będą ciągnąć go z powrotem, a sprężyny po drugiej stronie zostaną ściśnięte i będą go odpychać, również z powrotem w kierunku położenia równowagi. Wygląda na to, że wymyśliliśmy całkiem niezły model siły elektromagnetycznej działającej jak sprężyna.

Czym jednak jest sprężyna? Najczęściej spotykany w praktyce rodzaj sprężyny to kawałek drutu zwinięty w kształcie spirali albo helisy. Sprężysta spirala może być elementem mechanizmu zegara, modelu rzeczywistości przez wiele stuleci bardzo popularnego wśród fizyków, co czyni tę analogię jeszcze bardziej atrakcyjną. Gdy zwijamy sprężynę, zaczyna ona stawiać opór i rozwija się. Gdy ją rozwijamy, to się zwija. Dlaczego? Ponieważ sprężyna składa się z atomów utrzymywanych na swoich miejscach przez siły elektromagnetyczne! Siły, które odczuwamy, jeśli ciągniemy lub ściskamy sprężynę, to siły elektromagnetyczne. Tak więc, gdy mówimy, że siły między atomami w kryształach są podobne do małych sprężyn, to w istocie stwierdzamy, że siły elektromagnetyczne są podobne do sił elektromagnetycznych.

Atom jest tak powszechnie znanym pojęciem, że czasami trudno dostrzec proces powstawania modelu, co dobitnie ilustruje powyższe rozumowanie. Łatwiej jest zrozumieć tworzenie modelu, gdy przyjrzymy się, w jaki sposób fizycy skonstruowali standardowy model świata subatomowego, posługując się analogiami, które w wielu wypadkach nie są po prostu pożyczone z codziennego środowiska, lecz wręcz oparte na naszym pojmowaniu rzeczywistości. Wewnątrz jądra (które z punktu widzenia prostych modeli atomu uważane było za dodatnio naładowaną kulę bilardową) znaleźliśmy cząstki, które pod wieloma względami są podobne do elektronów, a występujące tam siły działają podobnie jak siły elektromagnetyczne. Ale elektrony i elektromagnetyzm są same w sobie opisywane jako „podobne” do obiektów z codziennego świata - kul bilardowych, fal na jeziorze i tym podobnych. Rzeczywistość jest taka, jaką ją tworzymy - dopóki modele wyjaśniają nasze obserwacje, dopóty są dobrymi modelami. Czy jednak rzeczywiście prawdą jest, że elektrony i protony czekały wewnątrz atomów, a kwarki wewnątrz protonów, dopóki ludzie nie stali się na tyle pomysłowi, aby je „odkryć”? Czy może prawda jest taka, że zasadniczo niezrozumiałe aspekty rzeczywistości na poziomie kwantowym zostały poukładane w pudełkach i nazwane „protonem” i „kwarkiem” wyłącznie dla ludzkiej wygody?

Konstruowanie kwarków

Andrew Pickering z uniwersytetu w Edynburgu podjął ten problem w doskonałej książce *Constructing Quarks*. „Prezentuję tutaj pogląd - pisze Pickering we wstępie do swojej książki - że realność kwarków jest rezultatem działalności fizyków, a nie na odwrót”. Stąd bierze się tytuł jego książki, który zapożyczyłem na użytek niniejszego rozdziału. Standardowy model rzeczywistości, uznawany przez większość fizyków, opiera się na założeniu, że świat jest zbudowany z czterech rodzajów cząstek i czterech sił. Obraz ten dodatkowo komplikuje fakt, że cząstki (lecz nie siły) występują w trzech „generacjach”, o podobnych właściwościach, lecz odmiennych masach. Z punktu widzenia zwykłych atomów do wyjaśnienia wszystkiego wystarczą cztery cząstki pierwszej generacji. Elektron stanowi jedną z podstawowych cząstek, z elektronem związana jest cząstka zwana neutrinem, a obie te cząstki zaliczane są do rodziny leptonów. Natomiast wewnętrzne cząstki jądra, czyli protony i neutrony, nie są uważane za podstawowe. Fizycy sądzą, że są one złożone z kwarków. Kwarki są zaliczane do podstawowych cząstek, a pierwsza generacja kwarków (odpowiedniki leptonów) składa się z dwóch elementów, kwarku „górnego” i „dolnego”. Nazwy nie mają żadnego znaczenia, są to jedynie etykiety używane przez fizyków. Równie dobrze kwarki te mogłyby nazywać się na przykład Beata i Adam.

Zgodnie z modelem standardowym proton składa się z dwóch kwarków górnych i jednego dolnego, natomiast neutron z dwóch kwarków dolnych i jednego górnego, utrzymywanych w całości przez jedną z czterech podstawowych sił. Każdy kwark górny jest obdarzony dodatnim ładunkiem równym dwóm trzecim ładunku elektronu, a każdy kwark górny - ujemnym ładunkiem równym jednej trzeciej ładunku elektronu. W rezultacie ładunek protonu jest równy jednostkowemu ładunkowi dodatniemu ($2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$), a neutron nie ma w ogóle ładunku ($2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$), czyli jest elektrycznie obojętny.

Oprócz oddziaływania silnego, które wiąże kwarki w protony i neutrony, a z protonów i neutronów tworzy jądra, istnieje także słabsza siła (zwana całkiem logicznie „oddziaływaniem słabym”), odpowiedzialna za radioaktywność. Pozostałe dwa fundamentalne oddziaływania to grawitacja i elektromagnetyzm. Kwarki są „podobne” do elektronów, słabe i silne oddziaływanie jest „podobne” do elektromagnetyzmu, operując za pośrednictwem wymiany cząstek zwanych bozonami, które są „podobne” do fotonów. Pod wieloma względami jest to prosty i przemawiający do wyobraźni obraz, który ponadto okazał się bardzo skuteczny w przewidywaniu wyników testów doświadczalnych. Newton z pewnością byłby zadowolony. W jaki sposób fizycy skonstruowali ten model subatomowego świata?

Pickering podkreśla, że żadna teoria nie jest doskonała. W zasadzie można wyobrazić sobie dowolną liczbę teorii, z których każda wyjaśni określony zbiór faktów eksperymentalnych. Jednym ze sposobów odsiewania złych teorii od dobrych jest wybór tych, które tłumaczą więcej faktów za pomocą mniejszej liczby założeń, lecz - jak się przekonałiśmy w rozdziale czwartym - nawet ta metoda może zostawić pewną swobodę wyboru. Niektóre teorie są po prostu uznawane za mniej prawdopodobne niż inne i odrzucane na tej podstawie. Co to jednak znaczy „prawdopodobne”? Mamy tu do czynienia z mniej lub bardziej arbitralną oceną, a przykład interpretacji kwantowych pokazał, w jakim stopniu ocena ta zależy od osobistych preferencji. Najważniejszy jest jednak fakt, że w całej historii nauki żadna teoria nie potrafiła wyjaśnić wszystkich faktów. Wielu fizyków twierdzi, że poszukują takiej teorii, nazywanej TOE¹⁰³. Jeżeli zawierzyć historii, to poszukiwania te okażą się bezowocne. Zawsze istnieją obszary niezgodności między teorią a eksperymentem i zawsze istnieje element subiektywnego wyboru przy podejmowaniu decyzji, które z tych niezgodności mogą być tolerowane, a które obalają daną teorię.

Niezgodności między teorią a eksperymentem mogą oczywiście powstać także i dlatego, że same eksperymenty nigdy nie są nieomyślne. Sposób analizy wyników eksperymentów (zwłaszcza takich, w których przedmiotem badań jest wewnętrzna struktura protonu) w dużym stopniu zależy od teoretycznej interpretacji eksperymentu i każda niedoskonałość teorii może wpływać na niedoskonałość eksperymentu (a w każdym razie na nasze zrozumienie jego wyników). Pickering zwraca także uwagę na nieodłączny problem fizyki cząstek - „szum” albo „tło”. Równoległe z procesami, które eksperymentatorzy starają się badać, zachodzą też inne zjawiska, których obserwowalne skutki mogą być bardzo podobne do skutków badanych zjawisk. Ich odróżnienie nie zawsze jest możliwe. Przypomina to próby wyeliminowania szumów i trzasków wychwytywanych w eterze przez odbiornik radiowy i dokładnego dostrojenia odbiornika do sygnału tej stacji, którą chcemy usłyszeć. Fizycy zresztą często stosują określenie „sygnał” dla badanego przez siebie zjawiska, a „szum” dla zakłóceń. Nie da się całkowicie wyeliminować szumów, więc w każdej sytuacji konieczna jest do pewnego stopnia subiektywna ocena jakości uzyskanych wyników i decyzja, czy szumy można zaniedbać.

¹⁰³ Od ang: *theory of everything* - teoria wszystkiego (przyp. tłum.).

Jednak sukces rodzi sukces. Gdy jakaś określona teoria okaże się dobrym opisem rzeczywistości (lub jest za takowy uważana), wypiera ona konkurencyjne teorie, które przestają odgrywać rolę w dalszych badaniach. Tak stało się z teoriami światła. Teoria cząstkowa królowała przez sto lat po Newtonie. Na skutek prac Younga i Fresnela, a następnie Maxwella, teoria falowa wyparła cząstkową. Obecnie uważamy obie te teorie za dobre modele. Kwarkowa teoria materii nie jest jeszcze tak wyrefinowana jak falowo-korpuskularna teoria światła. „Jeśli uznamy realność kwarków - mówi Pickering - to wybór modelu kwarkowego [...] staje się jak najbardziej naturalny: jeżeli kwarki rzeczywiście są podstawowymi cegiełkami do budowy świata, to po co się szuka alternatywnych teorii?” - nawet w sytuacji, gdy inne teorie również potrafią wytłumaczyć wszystkie fakty doświadczalne, co może przecież okazać się prawdą¹⁰⁴. Wielu fizyków popełnia kardynalny błąd, zapominając, że model standardowy jest właśnie tym, czym jest - m o d e l e m . Protony zachowują się tak, j a k g d y b y zawierały trzy kwarki, lecz nie dowodzi to, że kwarki rzeczywiście istnieją.

William Poundstone, w wydanej w 1988 roku książce *Labyrinths of Reason* ujął to następująco:

Naukowcy muszą się mieć na baczności, gdy mają do czynienia z pojęciami nieprzekładalnymi na fizyczne obrazy. Kwarki są hipotetycznymi obiektami, znajdującymi się głęboko wewnątrz protonów, neutronów i innych subatomowych cząstek. Ich status jest dosyć kontrowersyjny: nie tylko nie zaobserwowano nigdy pojedynczego kwarku, lecz większość teorii przewiduje, że pojedyncze kwarki nie istnieją. Kwarki są tym, na co podzieliłby się proton, gdyby można go podzielić, czego nie da się zrobić [...] niektórzy zastanawiają się, czy [domniemane właściwości kwarków] nie są sztuczną komplikacją jakiejś prostszej rzeczywistości, której na razie nie rozumiemy. Być może kiedyś ktoś na to wpadnie i zdamy sobie sprawę, że nasza obecna fizyka stanowi osobliwy sposób opisu tej rzeczywistości [...] Odpowiedź leży nie w chmurach, lecz w naszych głowach.

Poundstone nie do końca rozumie, o co chodzi w fizyce. Bo przecież protony, neutrony i inne subatomowe cząstki również są hipotetycznymi obiektami, projekcją zrodzonych w naszych umysłach modeli rzeczywistości. Być może istnieje prostszy sposób przedstawiania zjawisk fizycznych niż obecnie obowiązujący model kwarkowy. Nie będzie to jednak realny stan rzeczy, lecz kolejny model, na tej samej zasadzie, co równania Maxwella i fotony Einsteina są dobrymi modelami rzeczywistości reprezentowanej przez zjawisko światła, a kula bilardowa i układ planetarny mogą być dobrymi modelami atomu w zależności od rodzaju problemu, który mamy do rozwiązania.

Jak już wcześniej powiedziałem, cała fizyka polega na konstruowaniu analogii i modeli. Mają one za zadanie wyjaśnić rzeczywistość której nie jesteśmy w stanie badać naszymi własnymi zmysłami. Niezwykły postęp, jakiego dokonali fizycy w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych

¹⁰⁴ A. Pickering, *Constructing Quarks*, s. 7.

- w czasie gdy powstał model standardowy - opierał się na dwóch kluczowych analogiach. Jedna z nich polegała na rozszerzeniu modelu jądra, składającego się z protonów i neutronów, na same protony i neutrony jako cząstki składające się z kwarków. Druga analogia wykorzystwała opis fali elektromagnetycznej w kategoriach wymiany fotonów i zastosowała go do wytłumaczenia oddziaływania kwarków w kategoriach wymiany fotonopodobnych cząstek. Analogia z elektrodynamiką kwantową (QED) jest tak ścisła, że standardowa teoria tego silnego (lub „kolorowego”) oddziaływania nosi nazwę chromodynamiki kwantowej (QCD¹⁰⁵) - „chromo” dlatego, że niektóre cząstki noszą nazwy pochodzące od kolorów. Jest to oczywiście jedynie arbitralna konwencja - podobnie jak nazywanie kwarków górnym i dolnym - a nie sugestia, że cząstki te są rzeczywiście kolorowe w normalnym tego słowa znaczeniu.

Teoria kwarków nie pojawiła się z dnia na dzień w ostatecznej postaci i nie obaliła jednym ciosem całej opozycji, lecz zdobywała uznanie stopniowo, pokonując opory fizyków. Zaproponowali ją niezależnie od siebie dwaj teoretycy na początku lat sześćdziesiątych. Żaden z nich nie podjął jednak kampanii propagandowej na rzecz nowej teorii. Jednym z nich był Murray Gell-Mann, fizyk amerykański (urodzony w 1929 roku w Nowym Jorku), który wymyślił także nazwę, zapożyczając ją z *Finnegan's Wake* Jamesa Joyce'a. Gell-Mann pracował wtedy w Caltechu i już wcześniej zapracował sobie na opinię jednego z najwybitniejszych teoretyków w okolicy, dzięki skutecznym próbom pogrupowania znanych fizykom cząstek według ich właściwości oraz przewidywaniom właściwości cząstek, które dopiero miały zostać odkryte. Na podobnej zasadzie Dymitr Mendelejew pogrupował pierwiastki chemiczne w tablicy okresowej i przewidywał właściwości nie znanych dziewiętnastowiecznym chemikom pierwiastków - jeszcze jeden przykład skuteczności analogii i tradycjonalistycznego charakteru nauki.

To poszukiwanie regularności doprowadziło do odkrycia, że wiele właściwości protonów i neutronów można wytłumaczyć dzięki koncepcji trypletów podstawowych (na które obecnie mówimy kwarki) ułożonych na różne sposoby. Gell-Mann ogłosił to odkrycie w 1964 roku niemal z zażenowaniem, w zaledwie dwustronicowej publikacji w „Physics Letters”. Jeden z powodów jego wahania - i długoletniej niechęci większości fizyków wobec koncepcji kwarków - stanowiła konieczność uznania, że cząstki trypletowe mają ułamkowe ładunki elektryczne w stosunku do ładunku elektronu, który w owym czasie nie bez podstaw uważano za najmniejszy możliwy ładunek. Dzisiaj nikogo nie niepokoją ładunki kwarków wielkości jednej trzeciej lub dwóch trzecich ładunku elektronu, lecz w 1964 roku „każdy wiedział”, że jest to niemożliwe. W podsumowaniu swojej publikacji Gell-Mann niemal odrzucił własną koncepcję, pisząc, że tryplety, które tak prosto wyjaśniają właściwości protonów i neutronów, są w rzeczywistości jedynie matematyczną abstrakcją, sposobem ujęcia tych właściwości. Artykuł kończy się następująco¹⁰⁶:

¹⁰⁵ Od ang.: *quantum chromodynamics* (przyp. tłum.).

¹⁰⁶ „Physics Letters”, 8 (1964), s. 214.

Zabawne jest przewidywanie, jak zachowywałyby się kwarki, gdyby były fizycznymi cząstkami o skończonej masie (a nie czysto matematycznymi obiektami, jakimi byłyby w granicy nieskończonej masy) [...] Poszukiwania stabilnych kwarków o ładunkach $-1/3$ lub $+2/3$ czy stabilnych dikwarków o ładunkach $-2/3$, $+1/3$ lub $+4/3$ przy najwyższych możliwych do uzyskania energiach pomogłyby nam się przekonać, że realne kwarki nie istnieją.

Nawet teoretyk, który „wynałazł” kwarki, chciał się przekonać, że są one jedynie produktem jego wyobraźni i nie istnieją w realnym świecie! Nie jest to jednak aż tak dziwne, jak się na pierwszy rzut oka wydaje. „Odkrycie” kwarków przez Gell-Manna miało bardzo matematyczny charakter: zauważył on mianowicie, że pewne właściwości równań można wytłumaczyć, jeżeli się potraktuje protony i neutrony tak, jak gdyby były one zbudowane z trypletów, lecz zaczął badania od aspektów matematycznych, a nie od rozważania trypletów jako fizycznych cząstek.

Drugi wynalazca kwarków był nieco mniej powściągliwy w ogłaszaniu swojego odkrycia, co odbiło się negatywnie na jego karierze zawodowej. George Zweig urodził się w 1937 roku w Moskwie, lecz przeniósł się do Stanów Zjednoczonych, gdzie w 1959 roku ukończył studia na University of Michigan. Potem dostał się do Caltechu, gdzie po trzech niezbyt udanych latach jako doświadczalnik zajął się teorią i rozpoczął studia doktoranckie pod kierunkiem Richarda Feynmana. Podobnie jak Gell-Mann Zweig zdał sobie sprawę, że właściwości cząstek takich jak neutron i proton można wyjaśnić, jeżeli potraktuje się je jako obiekty złożone z innych cząstek, które nazwał „asami”. Zweig był młodszy od Gell-Manna i w świecie fizyki cząstek był w zasadzie nowicjuszem (a co za tym idzie, był mniej skłonny do ulegania tradycji), przez co łatwiej przyszło mu odrzucić uprzedzenia i potraktować te obiekty jako fizycznie realne cząstki.

W 1963 roku Zweig przeniósł się do CERN-u, europejskiego ośrodka fizyki cząstek w Genewie, gdzie ukończył pracę doktorską i przygotował ją do druku. Ukazała się ona w tym samym (1964) roku, co artykuł Gell-Manna. W zakończeniu Zweig doszedł do konkluzji, że „zważywszy na bardzo uproszczony sposób potraktowania problemu, uzyskane przez nas wyniki wydają się dosyć niezwykle”¹⁰⁷.

Większość fizyków zgodziła się z tą opinią. Zamiast uznania z ich strony Zweiga spotkały niemal wyłącznie przykrości graniczące z ostracyzmem. W 1980 roku na międzynarodowej konferencji Zweig wspominał:

Reakcja środowiska fizyków teoretyków na model asów nie była, ogólnie rzecz biorąc, przychylna. Moje próby opublikowania raportu CERN-u w takiej formie, jaką sam mu nadałem, spotkały się z tak silnym oporem, że w końcu ustąpiłem. Gdy wydział fizyki jednego z czołowych uniwersytetów rozważał zatrudnienie mnie, ich szef teoretyków, jeden z najbardziej poważanych

¹⁰⁷ Preprint CERN-u, nr 8182/TH401.

przedstawiciele fizyki teoretycznej na świecie, zablokował mój angaż na zebraniu rady wydziału, argumentując z pasją, że autorem modelu asów jest „szarlatan”¹⁰⁸.

W pierwotnej wersji publikacji, która stała się później znana jako „preprint CERN-u”, liczącej dwadzieścia cztery strony, Zweig - w odróżnieniu od Gell-Manna - szczegółowo przedstawił konsekwencje idei trypletów. Nawet to nie przyczyniło się do zmiany nastawienia środowiska fizyków.

W 1969 roku Gell-Mann otrzymał Nagrodę Nobla za prace i odkrycia związane z klasyfikacją cząstek elementarnych i ich oddziaływań. Nagroda była całkowicie zasłużona, lecz nawet w 1969 roku teoria kwarków nie była jeszcze w pełni uznana i nie została wymieniona z nazwy. Gdy kwarki zostały w końcu zaakceptowane jako element modelu standardowego, Komitet Noblowski doszedł prawdopodobnie do wniosku, że z jednej strony nie może uhonorować Zweiga bez Gell-Manna, a z drugiej - nie może powtórnie nagrodzić tego drugiego. Tak czy owak, fakt pozostaje faktem - człowiek, który pierwszy zasugerował możliwość, że kwarki są realnymi cząstkami, i który pierwszy przedstawił szczegółowe konsekwencje teorii kwarków, torując drogę ku koncepcji znanej obecnie jako model standardowy fizyki cząstek, nie otrzymał Nagrody Nobla. Inna rzecz, że nikt nigdy nie twierdził, że Nagrody Nobla przyznawane są absolutnie sprawiedliwie i na podstawie całkowicie racjonalnych przesłanek.

Teoria kwarków zaczęła być traktowana poważniej dopiero wtedy, gdy eksperymenty, w których zderzano cząstki (między innymi elektrony z protonami i protony z protonami), wykazały istnienie wewnętrznej struktury protonu. Nie jest to aż takie proste, jak się na pierwszy rzut oka wydaje, gdyż protony są obiektami znacznie bardziej skomplikowanymi od elektronów niezależnie od tego, czy są czy nie są zbudowane z kwarków (całe poniższe omówienie struktury protonu stosuje się również do neutronu, lecz eksperymenty są w rzeczywistości wykonywane na protonach, gdyż ich ładunek elektryczny umożliwia sterowanie nimi i przyspieszanie do wysokich energii za pomocą pól magnetycznych i elektrycznych).

Pamiętamy, że z punktu widzenia QED elektron jest punktową cząstką otoczoną przez chmurę wirtualnych fotonów, par elektron--pozyton i całej reszty. Moment magnetyczny elektronu został obliczony z niezwykłą dokładnością dzięki uwzględnieniu coraz bardziej skomplikowanych (wyższego rzędu) kategorii tego rodzaju oddziaływań, lecz kolejne kroki w kierunku coraz bardziej skomplikowanych konfiguracji dają coraz mniejsze poprawki do końcowego wyniku. Proton także jest obdarzony ładunkiem elektrycznym, więc również oddziałuje elektromagnetycznie z chmurą otaczających go wirtualnych cząstek, a jego moment magnetyczny może zostać obliczony w taki sam sposób jak dla elektronu. W odróżnieniu od elektronu proton „czuje” także oddziaływanie silne. Zanim jeszcze teoretycy zdali sobie sprawę, że oddziaływanie to łączy się z kwarkami, wiedzieli już, że wiąże ono protony i neutrony w jądrze i potrafili badać niektóre jego właściwości.

¹⁰⁸ Cytat zaczerpnięto z: N. Isgur (red.), *Baryon*, University of Toronto Press, Toronto 1981, s. 439.

Dzięki analogii z QED doszli do wniosku, że proton powinien być otoczony przez chmurę innych cząstek, łącznie z parami proton-antyproton i neutron-antyneutron oraz cząstkami przenoszącymi siłę, zwanymi mezonami (przenoszące silne oddziaływanie odpowiedniki fotonów). Istnieje jednak zasadnicza różnica. Przyczynki od silnych oddziaływań, pochodzące od wyższych rzędów rachunku - uwzględniające coraz bardziej skomplikowane konfiguracje wirtualnych cząstek - nie maleją wraz ze wzrostem komplikacji, lecz są równie istotne jak sam „realny” proton. W rezultacie - zgodnie z kwantową teorią pola - proton musi być traktowany jako skomplikowana kula oddziałujących cząstek wirtualnych, rozciągająca się na cały obszar zasięgu silnego oddziaływania - które na szczęście dociera tylko na odległość około 10^{-13} cm.

Eksperymenty badające strukturę protonu opierają się na założeniu, że istnieje poprawna teoria elektronu - QED. Teoretycy byli przekonani, że dobrze rozumieją elektrony i że mogą je traktować jako obiekty punktowe - tylko dlatego potrafili zinterpretować sposób, w jaki elektrony „rozpraszały” się na protonach i dzięki temu odkryć strukturę protonów. Gdy elektrony o wysokiej energii (czyli poruszające się bardzo szybko) zderzają się ze sobą w akceleratorze, mają tendencję do rozpraszania się pod bardzo dużymi kątami, odbijając się od siebie tak, jakby były twardymi obiektami - podobnie jak kule bilardowe. Gdy natomiast elektrony odbijają się od protonów, to zazwyczaj są odchylane pod niewielkimi kątami, tak jakby rozpraszały się na miękkich obiektach dających słaby opór. Te dwa rodzaje oddziaływań znane są jako rozpraszanie „twarde” i „miękkie”. Eksperymenty wykazały, że proton rzeczywiście ma średnicę około 10^{-13} cm, zgodną z przewidywaniami teorii pola. Jednak „odpowiedzi”, jakich natura udzieliła na pytania zadawane przez eksperymentatorów, zależały od wyboru eksperymentów i tego, co się w nich mierzy. Jak ujął to filozof Martin Heidegger:

Współczesna fizyka nie jest fizyką eksperymentalną dlatego, że używa eksperymentalnych narzędzi do badań natury. Bliższe prawdy byłoby odwrotne stwierdzenie, ponieważ fizyka, jako czysta teoria, żąda od natury ujawnienia się w postaci przewidywalnych sił, konstruując eksperymenty wyłącznie po to, aby pytać naturę, czy i jak stosuje się ona do schematu przewidzianego przez naukę¹⁰⁹.

Istnieje zadziwiające podobieństwo między odkryciem (lub wynalezieniem) kwarków - w pierwszej połowie lat sześćdziesiątych - przez dwóch ludzi stosujących dwa tak odmienne podejścia a rozwinięciem dwóch równie odmiennych metod analizy eksperymentów z rozpraszaniem cząstek pod koniec tej samej dekady. Jeden z nich, James Bjorken ze Stanford University, zastosował - podobnie jak kilka lat wcześniej Gell-Mann - czysto matematyczne podejście, które sprawdziło się w działaniu, lecz, zdaniem Pickeringa, było „ezoteryczne do granic

¹⁰⁹ M. Heidegger, *The Question Concerning Technology*, Harper & Row, New York 1977, s. 21.

niezrozumiałości"¹¹⁰. Autorem drugiego podejścia był Richard Feynman, co oznacza, że metoda jest z a r ó w n o skuteczna, jak i rozumiała.

Wielką zaletę podejścia Feynmana stanowi fakt, że jest ono zrozumiałe dla fizyków przyzwyczajonych do rozbierania obiektów (na przykład atomów) na elementy składowe i badania w ten sposób, z czego są one zbudowane. Feynman stworzył swoją metodę w połowie lat sześćdziesiątych i opublikował ją w 1969 roku. Nie przesądzając, czy kwarki istnieją, opracował on o g ó l n e wytłumaczenie zjawisk, które zachodzą, gdy elektron o wysokiej energii sonduje wnętrze protonu lub gdy dwa protony o wysokich energiach zderzają się ze sobą.

Punktem wyjścia dla Feynmana była zaczerpnięta z teorii pola koncepcja, zgodnie z którą proton musi być kłębowiskiem cząstek. Analogia z QED mówi, że byłby on kulą protonów, neutronów, ich antycząstek oraz mezonów. Według teorii kwarków proton miałby się składać z trzech podstawowych cegiełek, lecz z kolei każda z nich byłaby związana z własną chmurą wirtualnych cząstek. Celowo nie opowiadając się za żadną z tych możliwości, Feynman nazwał te wewnętrzne składniki partonami¹¹¹, aby uwzględnić obie możliwości, lecz rychło zdał sobie sprawę, że w pojedynczym zderzeniu dwóch cząstek ta złożona struktura odgrywa niewielką rolę. Gdy elektron zostaje wystrzelony w kierunku protonu, to może on na przykład wymienić foton z jednym partonem. Parton ulega odrzutowi, elektron zmienia trajektorię i na tym koniec (z punktu widzenia obu cząstek). Nawet gdy dwa protony zderzają się czołowo, cały efekt sprowadza się do serii pojedynczych, punktowych zderzeń pomiędzy partonami. Bjor-ken pokazał (wtajemniczonym!), że mechanizm, dzięki któremu protony się rozpraszają, mógłby opisać konkretny matematyczny formalizm, a następnie wspomniał, niemal mimochodem, że jednym ze sposobów dojścia do tego formalizmu byłoby założenie, że protony zawierają punktowe cząstki. Feynman stwierdził, że gdyby protony zawierały punktowe cząstki, to prowadziłyby to do matematycznego opisu, który wyjaśniałby obserwowane w zderzeniach zjawiska.

Pickering uważa, że podejście Feynmana wygrało - i przyczyniło się do ostatecznej eksperymentalnej weryfikacji „realności” kwarków, ku zadowoleniu większości teoretyków - dlatego, że było kontynuacją uznanej i rozumiałej tradycji. Teoretycy opierali swoje analizy na gotowej analogii z eksperymentami, które w początkach dwudziestego wieku pozwoliły odkryć strukturę atomu. Pionier fizyki cząstek, Ernest Rutherford, bombardował atomy za pomocą tak zwanych cząstek alfa (obecnie wiemy, że są to jądra helu) i przekonał się, że niektóre z nich były rozpraszane pod zadziwiająco dużymi kątami. Stanowiło to dowód, że wewnątrz atomu znajduje się jakiś mały, twardy obiekt (jądro). Eksperymenty z lat sześćdziesiątych wykazały, że elektrony rozpraszają się niekiedy pod zadziwiająco dużymi kątami od skądinąd miękkich protonów. Model Feynmana wytłumaczył to istnieniem twardych, punktowych obiektów wewnątrz protonu.

¹¹⁰ A. Pickering, *Constructing Quarks*, s. 132. Cieszę się, że mogę zacytować opinię Pickeringa, gdyż dla mnie podejście Bjorkena jest z pewnością niezrozumiałe, a jeśli chodzi o jego skuteczność, to muszę polegać na zdaniu moich kolegów matematyków.

¹¹¹ Od ang.: *part* - część (przyp. tłum.).

Minęły lata, zanim model standardowy został ostatecznie potwierdzony, lecz od chwili, gdy po raz pierwszy wzięto go pod uwagę, otaczała go aura nieuchronnego sukcesu. Mając do dyspozycji dwie wielkie analogie - jądrowy model atomu i QED, teorię światła - kwarkowy model protonów i neutronów oraz QCD, teoria silnych oddziaływań, stały się niezwyciężone. „Analogia nie była jedną z wielu możliwych opcji - mówi Pickering - lecz podstawą wszystkich odkryć. Bez analogii nie byłoby nowej fizyki”¹¹².

To samo można powiedzieć o mechanice kwantowej. Nie sposób widzieć w niej coś innego niż analogię. Wystarczy wziąć klasyczny przykład - dualizm falowo-korpuskularny. Próbuje się wyjaśnić coś, czego nie rozumiemy, za pomocą dwóch wzajemnie wykluczających się analogii zastosowanych do jednego i tego samego obiektu kwantowego.

Pickering podniósł także inną intrygującą, a może nawet niepokojącą kwestię. Czy dojście do modelu standardowego fizyki cząstek rzeczywiście było nieuniknione? Czy jest to jedyna prawda o mechanizmie funkcjonowania świata? Żadna z teorii, które doprowadziły do powstania modelu standardowego, nigdy nie była idealnie ścisła i fizycy cząstek musieli wciąż dokonywać wyboru, które z nich odrzucić, a które rozwijać dalej i próbować lepiej dopasować do danych doświadczalnych. Wybór teorii wywierał także wpływ na wybór eksperymentów. Ten łańcuch wzajemnie uzależnionych i współoddziałujących decyzji doprowadził do powstania nowej fizyki. Nowa fizyka jest wytworem kultury, w której została stworzona.

Filozof nauki, Thomas Kuhn, doprowadził to rozumowanie do logicznej konkluzji, argumentując, że jeżeli wiedza naukowa jest rzeczywiście produktem kultury, to społeczności naukowe, które istnieją w różnych światach (być może dosłownie na innych planetach lub też w różnych chwilach na tej samej planecie), przywiązują różną wagę do różnych zjawisk przyrody i w różny sposób wyjaśniają te zjawiska - za pomocą różnych modeli teoretycznych (i różnych analogii). Teorii pochodzących z różnych społeczności naukowych - różnych światów - nie można by ze sobą porównywać, gdyż byłyby one, mówiąc żargonem filozofów, niewspółmierne.

Powyższe rozumowanie jest jawnie sprzeczne z tym, co o swojej pracy myśli większość fizyków. Sądzą oni, że jeżeli kiedykolwiek nawiążemy kontakt z nauką cywilizacją z innej planety, to okaże się - pod warunkiem że przezwyciężymy barierę języka - że cywilizacja ta podziela nasze poglądy na naturę atomu, istnienie protonów i neutronów oraz działanie sił elektromagnetycznych. Niejedna książka fantastycznonaukowa sugeruje, że nauka jest (dosłownie) językiem uniwersalnym, czyli że obowiązującym w całym uniwersum sposobem nawiązania komunikacji z obcą cywilizacją i poznania tego, co nas z nią łączy, mógłby na przykład być opis chemicznych właściwości pierwiastków lub natury kwarków. Gdyby okazało się, że kosmici mają całkowicie odmienne koncepcje na temat natury atomu lub w ogóle nie znają tego pojęcia, to próby nawiązania kontaktu tą drogą byłyby z góry skazane na niepowodzenie.

¹¹² A. Pickering, *Constructing Quarks*, s. 407.

Koncepcja nauki jako uniwersalnego języka jest zazwyczaj najdobitniej wyrażana w kontekście matematyki. Wielu naukowców komentowało fakt, że matematyka jako narzędzie do opisu wszechświata „działa” w sposób wyraźnie magiczny. Albert Einstein stwierdził, że „najbardziej niezrozumiałą rzeczą dotyczącą wszechświata jest fakt, że jest on zrozumiały”. Swego czasu dziwiło mnie, że przeciętna istota ludzka potrafi w czasie swojego życia nauczyć się dostatecznie wiele o wszechświecie, aby go w taki czy inny sposób rozumieć. Obecnie sądzę, że nie jest to aż tak dziwne. Pickering przekonał mnie, że patrzyłem na tę zagadkę od niewłaściwej strony. Cytuje on Johna Polkinghorne'a, angielskiego specjalistę od teorii kwantów, który powiedział: „to, że potrafimy zrozumieć świat i że matematyka stanowi idealny język nauk fizycznych - słowem, że nauka jest w ogóle możliwa - nie jest trywialne”¹¹³.

Pickering uważa, że tego rodzaju poglądy są błędne:

Jest o c z y w i s t e , że naukowcy produkują opisy świata, które są dla nich zrozumiałe: przy danych zasobach kulturowych jedynie wyjątkowa niekompetencja mogłaby przeszkodzić członkom społeczności [fizyków] w tworzeniu zrozumiałych wersji opisu rzeczywistości w jakimkolwiek momencie historii. Zważywszy na ich gruntowne wykształcenie w dziedzinie zaawansowanych metod matematyki, powszechne użycie narzędzi matematycznych w języku fizyki cząstek nie jest trudniejsze do wyjaśnienia niż дума, jaką odczuwają członkowie grupy etnicznej z posiadania własnego narzecza.

Innymi słowy, tajemniczy fakt, że matematyka stanowi dobry język do opisu wszechświata, jest równie doniosły, jak odkrycie, że angielski jest dobrym językiem do pisania dramatów. Jeżeli poglądy na świat są rzeczywiście produktami kultury, jak uważają Pickering i Kuhn, to istnienie rozmaitych interpretacji kwantowej rzeczywistości nie powinno być niespodzianką. Zanim szerzej rozwiemy ten temat, kilka przykładów z innej dziedziny nauki powinno pomóc przekonać czytelnika, że istotnie nie ma nic dziwnego w fakcie, iż potrafimy opisywać wszechświat za pomocą matematyki, a to, w jaki sposób interpretujemy matematyczny opis rzeczywistości, jest w dużej mierze (a być może całkowicie) kwestią wyboru.

Einstein we właściwej perspektywie

Jednym z przykładów ilustrujących potęgę matematyki w opisywaniu wszechświata, na który często się powołuję, jest pewna gałąź geometrii, która dla dziewiętnastowiecznych matematyków była jedynie zbiorem abstrakcyjnych idei bez żadnego zastosowania w rzeczywistym świecie, a która okazała się kamieniem węgielnym ogólnej teorii względności Einsteina. Co ciekawe, sam Einstein z początku nie zdawał sobie z tego sprawy. Dopiero gdy zwrócono jego uwagę (dość brutalnie) na potęgę dziewiętnastowiecznej matematyki, zreflektował się i zdołał zaprząć matematykę do sformułowania swojego modelu świata.

¹¹³ Cytaty ten i następny pochodzą z: A. Pickering, *Constructing Quarks*, s. 413.

Kluczem do ogólnej teorii względności jest idea zakrzywionej czasoprzestrzeni. Einstein nie był jednak ani twórcą geometrii czasoprzestrzeni, ani pierwszą osobą, która wprowadziła koncepcję zakrzywionej przestrzeni. Obie teorie względności najłatwiej jest zrozumieć w kategoriach geometrii. W rozdziale drugim przekonaliśmy się, że przestrzeń i czas są elementami jednej czterowymiarowej czasoprzestrzeni. Szczególną teorię względności, w której mamy do czynienia z ruchami ze stałymi prędkościami, można wyjaśnić za pomocą geometrii płaskiej czterowymiarowej przestrzeni. Równania szczególnej teorii względności, które opisują między innymi tak dziwne zjawiska, jak dylatacja czasu oraz skrócenie długości poruszających się przedmiotów, są niczym innym jak rozszerzeniem powszechnie znanego twierdzenia Pitagorasa na cztery wymiary z drobnym zastrzeżeniem, że czas jest odmierzany w ujemnym kierunku.

Pojęcia te (i ich zrozumienie) można łatwo rozszerzyć na ogólną teorię względności, która jest teorią grawitacji i ruchów przyspieszonych. To, co przyzwyczajeni jesteśmy uważać za siłę spowodowaną przez obecność we wszechświecie brył materii (na przykład Słońca), w rzeczywistości jest zakrzywieniem struktury czasoprzestrzeni. Słońce jest źródłem wgniecenia w geometrii czasoprzestrzeni, Ziemia porusza się wokół Słońca po takiej, a nie innej orbicie, ponieważ wybiera najkrótszą możliwą drogę (tak zwaną geodezyjną) przez zakrzywioną czasoprzestrzeń.

Aby poznać parametry tej orbity, trzeba oczywiście rozwiązać kilka równań, lecz możemy to zostawić matematykom. Aspekty fizyczne teorii względności są rozbijająco proste i często podawane są jako przykład wyjątkowego geniuszu Einsteina.

Tyle tylko, że nic z tej prostoty nie pochodzi od Einsteina.

Weźmy na początek szczególną teorię względności. Gdy Einstein przedstawił ją światu w 1905 roku, miała formę czysto matematyczną, opartą wyłącznie na równaniach. Z początku nie zrobiła wielkiego wrażenia. Świat nauki zwrócił na nią uwagę dopiero po kilku latach, po części dzięki wykładom, które w 1908 roku wygłosił w Kolonii Hermann Minkowski. Dopiero w tych wykładach, opublikowanych w 1909 roku, wkrótce po śmierci Minkowskiego, koncepcje szczególnej teorii względności zostały przedstawione w ujęciu geometrii czasoprzestrzeni. We wstępie Minkowski zwraca uwagę na potęgę tego nowego ujęcia:

Poglądy na przestrzeń i czas, które chciałbym zaprezentować, zrodziły się z fizyki eksperymentalnej i na tym polega ich siła. Są one radykalne. Odtąd sama przestrzeń i sam czas zanikną, a tylko pewnego rodzaju połączenie ich obu zachowa status rzeczywistości¹¹⁴.

Olbrzymie uproszczenie teorii względności przez Minkowskiego bardzo posunęło sprawę do przodu. Nie jest zbiegiem okoliczności, że pierwszy doktorat honorowy Einsteina - uniwersytetu w

¹¹⁴ Cytowane za: A. Pais, *Subtle is the Lord*, Oxford University Press, Oxford 1982, s. 152. Inne cytaty w tej części pochodzą z tego samego źródła.

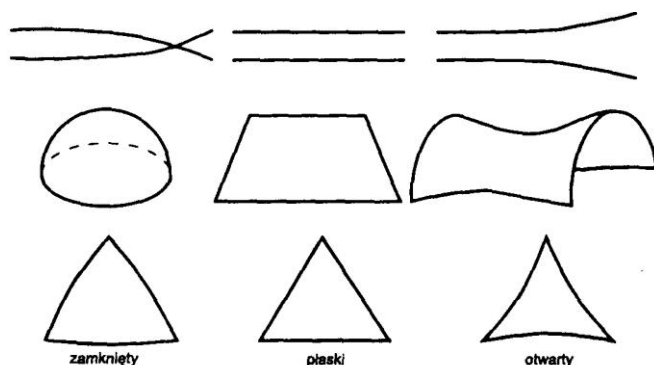
Genewie - został mu przyznany w lipcu 1909 roku, a jego kandydatura do Nagrody Nobla została wysunięta w rok później.

Pewien aspekt tej historii nadaje jej niezwykle ironicznego charakteru. Minkowski był jednym z nauczycieli Einsteina na politechnice w Zurychu pod koniec dziewiętnastego wieku. Zaledwie kilka lat przed stworzeniem szczególnej teorii względności Einstein został nazwany przez Minkowskiego „leniuchem”, który „nigdy nie zawracał sobie głowy matematyką”. Geometryzacja teorii względności nie wywarła z początku wrażenia na naszym leniuchu, któremu trochę czasu zajęło, zanim docenił jej znaczenie. Einstein nie przejmował się matematyką w czasie studiów i był zadziwiająco słabo zaznajomiony z jednym z głównych osiągnięć dziewiętnastowiecznej matematyki. Dopiero przyjaciel i towarzysz ze studiów, Marcel Grossman, zwrócił jego uwagę na pojęcie zakrzywionej czasoprzestrzeni.

Einstein nie pierwszy raz zwracał się o pomoc do Grossmana, który był jego rówieśnikiem na politechnice, a zarazem bardziej wytrwałym i pilnie notującym studentem. To właśnie notatki Grossmana pomogły Einsteinowi nadrobić zaległości i przebrnąć przez końcowe egzaminy na politechnice w 1900 roku.

Dopóki Grossman go nie uświadomił, w 1912 roku, Einstein nie wiedział, że geometria to coś więcej niż stara, „płaska” geometria Euklidesa, nawet w wielu wymiarach.

Z geometrią euklidesową po raz pierwszy spotykamy się w szkole, gdy uczymy się, że suma kątów trójkąta wynosi 180 stopni, proste równoległe nigdy się nie przecinają i tak dalej. Pierwszą osobą, która poszła dalej niż Euklides, był Karl Gauss, urodzony w 1777 roku matematyk niemiecki, który wszystkich swoich wielkich odkryć matematycznych dokonał przed rokiem 1799. Gauss doskonale zdawał sobie sprawę ze znaczenia swoich prac w dziedzinie geometrii nieeuklidesowej, lecz nie zadał sobie trudu, aby je opublikować.



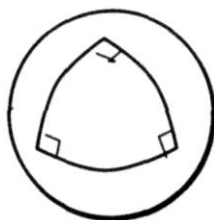
Ryc. 20. Przestrzeń może odpowiadać jednej z trzech podstawowych geometrii. Przedstawiamy to w dwóch wymiarach, chociaż w rzeczywistości przestrzeń jest trójwymiarowa. Jeżeli przestrzeń ma dodatnią krzywiznę, to wszechświat jest zamknięty. W dodatnio zakrzywionej przestrzeni linie równoległe (w potocznym rozumieniu tego słowa) mogą się przecinać, a suma kątów trójkąta przekracza 180 stopni (rycina lewa). Jeżeli przestrzeń ma ujemną krzywiznę, to wszechświat jest otwarty. W ujemnie zakrzywionej przestrzeni linie równoległe mogą się oddalać jedna od drugiej, a suma kątów trójkąta jest mniejsza niż 180 stopni (rycina prawa). Jeżeli przestrzeń jest płaska, to linie równoległe i trójkąty stosują się do reguł geometrii, które poznaliśmy w szkole (geometria euklidesowa). Płaska przestrzeń jest szczególnym przypadkiem (zerowa krzywizna) oddzielającym krzywiznę dodatnią od ujemnej (rycina środkowa).

Krzywizna naszego wszechświata jest nieodróżnialnie bliska zerowej

Niezależnie od niego geometrię nieeuklidesową odkrył Rosjanin, Nikołaj Iwanowicz Łobaczewski, który pierwszy opublikował jej opis, oraz Węgier, Janos Bolyai.

Wszyscy oni natrafili na ten sam rodzaj „nowej” geometrii, która stosuje się do powierzchni zwanej hiperboliczną, kształtem przypominającej siodło lub przełęcz górską. Na powierzchni takiej suma kątów trójkąta wynosi zawsze mniej niż 180 stopni, a przez dowolny punkt nie należący do danej prostej można przeprowadzić wiele prostych, które jej nie przecinają, a zatem są do niej równoległe.

Jednak dopiero Bernhard Riemann, uczeń Gaussa, stworzył w latach pięćdziesiątych dziewiętnastego wieku wyczerpujące podstawy nieeuklidesowej geometrii, a także odkrył jeszcze jedną możliwość -geometrię zamkniętej powierzchni sfery (na przykład powierzchni Ziemi). W geometrii sfery suma kątów trójkąta wynosi zawsze więcej niż 180 stopni, południki przecinają równik pod kątami prostymi, czyli muszą być wzajemnie równoległe, a jednak spotykają się wszystkie na biegunach.



Ryc. 21. Sfera, podobnie jak powierzchnia Ziemi, stanowi przykład powierzchni zamkniętej. Na powierzchni sfery kąty trójkąta - trzy kąty proste - mogą w sumie dać 270 stopni

10 lipca 1854 roku Riemann wygłosił wykład zatytułowany „O hipotezach, które leżą u podstaw geometrii”. W wykładzie tym - opublikowanym dopiero w 1867 roku, rok po śmierci Riemanna - poruszył olbrzymią liczbę zagadnień, łącznie z definicją zakrzywienia przestrzeni i metodą mierzenia tej krzywizny, pierwszym opisem geometrii sfery (a nawet wyraził przypuszczenie, że przestrzeń, w której żyjemy, może być lekko zakrzywiona, dzięki czemu cały wszechświat mógłby być zamknięty, na podobieństwo sfery - lecz nie w dwóch wymiarach, a w trzech), a także - co najważniejsze - z rozszerzeniem geometrii na wiele wymiarów za pomocą algebry.

Riemann zmarł na gruźlicę w wieku 39 lat, w 1866 roku. Chronologicznie Einstein nie był jednak nawet drugą osobą, która rozważała możliwość, że przestrzeń naszego wszechświata jest zakrzywiona.

Okres między pracami Riemanna a urodzinami Einsteina wypełnia życie i działalność angielskiego matematyka, Williama Clifforda (1845--1879), który, podobnie jak Riemann, zmarł na gruźlicę. Clifford przetłumaczył prace Riemanna na angielski i odegrał główną rolę w rozpowszechnieniu idei zakrzywionej przestrzeni i szczegółów nieeuklidesowej geometrii w świecie angielskojęzycznym. Wiedział on o tym, że nasz trójwymiarowy wszechświat może być zamknięty i skończony, podobnie jak dwuwymiarowa powierzchnia sfery jest zamknięta i skończona, lecz w ramach geometrii o co najmniej czterech wymiarach. Znaczyłoby to, że - podobnie jak podróżnik na Ziemi wyruszający w dowolnym kierunku i podróżujący wzdłuż linii prostej w końcu dotrze do

punktu wyjścia - podróżnik w zamkniętym wszechświecie mógłby wyruszyć w dowolnym kierunku w przestrzeni i poruszając się cały czas do przodu, dotarłby w końcu do punktu wyjścia.

Clifford zdał sobie sprawę, że oprócz ogarniającego cały wszechświat zakrzywienia, może ono przejawiać się także lokalnie. W 1870 roku przedstawił on Towarzystwu Filozoficznemu w Cambridge pracę, w której opisał „zmienną zakrzywienie przestrzeni”, różne w różnych miejscach przestrzeni, i zasugerował, że „małe obszary przestrzeni są w istocie podobne do małych wzgórz na powierzchni [Ziemi], która w dużej skali jest płaska”. Innymi słowy, siedem lat przed urodzeniem Einsteina Clifford rozważał l o k a l n e zaburzenia struktury przestrzeni, aczkolwiek nie próbował określić możliwych przyczyn takiego zakrzywienia ani ewentualnych konsekwencji obserwacyjnych jego istnienia, a ogólna teoria względności w gruncie rzeczy postuluje, że Słońce i gwiazdy są źródłami wgnieceń, a nie wzgórz, i to w czasoprzestrzeni, a nie w zwykłej przestrzeni.

Clifford nie był wprawdzie jedynym badaczem studiującym w drugiej połowie dziewiętnastego wieku nieeuklidesową geometrię, lecz bez wątpienia należał do najlepszych i doskonale zdawał sobie sprawę, jakie znaczenie może ona mieć dla rzeczywistego wszechświata. Trudno oprzeć się spekulacjom, do jakiego stopnia Clifford uprzedziłby Einsteina, gdyby nie jego przedwczesna śmierć - zmarł jedenaście dni przed dniem urodzenia Einsteina.

Gdy Einstein stworzył szczególną teorię względności, był całkowicie nieświadomy osiągnięć dziewiętnastowiecznej matematyki w dziedzinie geometrii przestrzeni wielowymiarowych i zakrzywionych. Wielkim osiągnięciem tej teorii było uzgodnienie zachowania światła, opisanego przez elektromagnetyczne równania Maxwella - a zwłaszcza faktu, że prędkość światła jest stałą absolutną - z mechaniką, aczkolwiek kosztem odrzucenia mechaniki Newtona i zastąpienia jej przez udoskonaloną wersję.

Ponieważ konflikt między mechaniką Newtona a elektrodynamiką Maxwella był w początkach dwudziestego wieku dobrze widoczny, często mówi się, że szczególna teoria względności była dzieckiem swoich czasów i gdyby Einstein nie odkrył jej w 1905 roku, to uczyniłby to w ciągu paru lat ktoś inny.

Z kolei przeskok od szczególnej do ogólnej teorii względności - nowej, nienewtonowskiej teorii grawitacji - jest powszechnie uważany za dzieło wyjątkowego geniuszu, powstałe dziesiątki lat przed swoim czasem, którego jedynym ojcem jest Einstein i które nie miało prekursorów wśród problemów, jakimi zajmowali się fizycy współcześni Einsteinowi.

Jest to z pewnością prawda, lecz trzeba także dodać, że droga, którą przebył Einstein od szczególnej do ogólnej teorii względności (w okresie ponad dziesięciu lat między 1905 a 1916 rokiem), była bardziej mozolna i skomplikowana, niż było to konieczne. Ogólna teoria w równie naturalny sposób wynika z dziewiętnastowiecznej m a t e m a t y k i , jak szczególna z dziewiętnastowiecznej f i z y k i .

Gdyby Einstein nie był takim leniuchem i nieco pilniej uczęszczał na wykłady z matematyki na politechnice, to być może udałoby mu się stworzyć ogólną teorię względności wkrótce po opublikowaniu w 1905 roku szczególnej teorii względności. A gdyby Einstein nigdy się nie urodził,

to być może ktoś inny, na przykład sam Grossman, potrafiłby wykorzystać prace Riemanna i Clifforda i stworzyć w drugim dziesięcioleciu dwudziestego wieku geometryczną teorię grawitacji.

Gdyby Einstein znalazł dziewiętnastowieczną geometrię, znacznie szybciej uporałby się ze swoimi dwiema teoriami względności, gdyż ich związek z wcześniejszymi odkryciami byłby oczywisty. Wyjątkowy geniusz Einsteina byłby mniej widoczny, lecz związek jego idei z nowymi prądami w matematyce zostałby lepiej wyeksponowany i być może przyczyniłby się do przyznania mu Nagrody Nobla za ogólną teorię względności.

Rola matematyki w odkryciu teorii względności jest nie do podważenia, lecz historię tę można przedstawić na wiele innych sposobów; w podobnym duchu przedstawiłem ją w artykule napisanym dla „New Scientist” na początku 1993 roku. W wyniku ukazania się tego artykułu otrzymałem list od Brunona Augensteina, pracownika ośrodka badawczego firmy RAND w Santa Monica w Kalifornii. Dzięki niemu mogłem zobaczyć tę historię w całkiem innym świetle, co przekonało mnie, że Pickering ma rację, gdy opisuje, w jaki sposób funkcjonuje nauka.

„Przez jakiś czas - pisze Augenstein - byłem zwolennikiem szkoły Wignera i Dysona («nieuzasadniona skuteczność matematyki w dziedzinie nauk fizycznych.»), lecz obecnie uważam, że pogląd przedstawiony w pańskim artykule powinien otrzymać status silnego aksjomatu operacyjnego, czyli: dosłownie dla każdej koncepcji matematycznej istnieje gdzieś model fizyczny. Fizycy powinni świadomie i systematycznie poszukiwać fizycznych modeli odpowiadających wszystkim odkrytym strukturom matematycznym”.

Innymi słowy, jak sugeruje Pickering, fizycy są zdolni do stworzenia zrozumiałej wersji rzeczywistości z j a k i e g o k o l w i e k niesprzecznego surowca.

Muszę przyznać, że to nie jasność i przenikliwość mojego artykułu przekonała Augensteina. Już wcześniej odkrył on, że dosyć mało znana dziedzina matematyki (którą nazwał „cokolwiek surrealistyczną gałęzią teorii zbiorów”) zajmująca się zagadnieniami znanymi jako twierdzenia Banacha-Tarskiego (TBT), stanowi jeszcze jeden przykład sytuacji, gdy praca w dziedzinie czystej matematyki, której początkowo nie przypisywano żadnego związku z realnym światem, nieoczekiwanie znalazła zastosowanie w fizyce. W tym wypadku zastosowaniem tym okazała się pierwotna wersja teorii kwarków Gell-Manna i Zweiga.

Nie będę zagłębiał się w szczegóły, gdyż nie pozwala na to zbyt słaba znajomość „surrealistycznej gałęzi teorii zbiorów”, więc muszę oprzeć się na opinii Augensteina¹¹⁵. Zasadniczą kwestią jest fakt, że prace Banacha i Tarskiego (opublikowane w 1924 roku) dotyczą sposobów rozkładania obiektów na części składowe, a następnie składania z powrotem po to, aby uzyskać coś innego¹¹⁶. Jak mówi Augenstein, „można pociąć sztywne ciało A o dowolnych (lecz skończonych) rozmiarach i dowolnym kształcie na m kawałków, a następnie, nie zmieniając w

¹¹⁵ Popartej faktem, że jego koncepcje zostały zaakceptowane do publikacji w czasopiśmie „Speculations in Science and Technology” [Spekulacje w nauce i technologii], które wbrew swojej nazwie jest bardzo poważanym periodykiem naukowym.

¹¹⁶ S. Banach, A. Tarski, „Fundamenta Mathematica”, 6 (1924), s. 244.

żaden sposób ich kształtów, można z nich złożyć sztywne ciało B, również o dowolnych skończonych rozmiarach i dowolnym kształcie".

Twierdzenie rzeczywiście surrealistyczne - lecz na tyle ogólne, że w zasadzie pozbawione praktycznych zastosowań. Augenstein wybrał szczególną wersję tego twierdzenia - dotyczącą kul. Sztywną kulę o jednostkowym promieniu można pociąć na pięć kawałków w taki sposób, że z dwóch spośród nich można złożyć kulę o jednostkowym promieniu, podczas gdy z pozostałych trzech da się złożyć drugą kulę również o jednostkowym promieniu. Aby sztuczka się powiodła, kawałków musi być co najmniej pięć, lecz manewr można powtórzyć nieskończoną liczbę razy - i łatwo odgadnąć, co będzie dalej.

W pracy opublikowanej w „Speculations in Science and Technology” Augenstein pokazał, że reguły, które rządzą zachowaniem tych matematycznych zbiorów i podzbiorów, są formalnie równoważne regułom rządzącym zachowaniem kwarków i gluonów w modelu standardowym cząstek - chromodynamice kwantowej (QCD), która została stworzona pół wieku po ukazaniu się oryginalnej pracy TBT. Fizycy, którzy sformułowali model standardowy, nic nie wiedzieli o tej surrealistycznej gałęzi teorii zbiorów. Pamiętamy, że w modelu tym protony i neutrony składają się z trypletów kwarkowych, a gluony, które wiążą protony i neutrony ze sobą (odpowiedniki fotonów w QED) - z par kwarków.

Magiczny sposób, w jaki padający na metalową tarczę proton produkuje mrowie protonów - identycznych kopii samego siebie wyłaniających się z tarczy - dokładnie odpowiada procedurze TBT, w której kulę rozcina się na części i tworzy z nich parę kul. Procedura TBT została określona jako „najbardziej zadziwiający rezultat teoretycznej matematyki”. Jest to pogląd, który poparłby Augenstein; niektórzy czytelnicy być może także się z nim zgodzą.

Co ciekawe, analogia Augensteina może również służyć do przewidywania. Podobnie jak w przypadku protonów, które niegdyś uważano za pozbawione struktury kulki bilardowe, a następnie w wyniku sondowania przez wysokoenergetyczne elektrony odkryto w ich wnętrzu trzy kwarki (Rutherford sondował atom i odkrył w środku jądro), najnowsze plany fizyków eksperymentalnych sugerują, że da się osiągnąć jeszcze wyższe energie i sondować wnętrze kwarków - jeżeli tylko coś się tam znajduje. Być może nie jest zbiegiem okoliczności fakt, że pięć matematycznych „kawałków” w twierdzeniach Banacha i Tarskiego ma różne właściwości; cztery z nich sugerowałyby bardzo szczegółową strukturę wewnątrz kwarków, podczas gdy piąty jest matematycznym opisem pojedynczego punktu.

Augenstein nie jest jedyną osobą, którą intrygują konsekwencje twierdzeń Banacha-Tarskiego dla fizyki cząstek. W 1982 roku Roger Jones napisał w książce *Physics as Metaphor*.

Dlaczego mion istnieje, skoro nie robi nic, czego nie mógłby zrobić elektron [...] Mion jest około 200 razy cięższy od elektronu [...] różnią się one [jedynie] pod względem masy.

Inne cząstki różnią się pod wieloma istotnymi względami, lecz elektron i mion przypominają dwa odcinki zbudowane w taki sam sposób z elementarnych punktów, lecz o różnych długościach. Elektron i mion są kulami o różnych rozmiarach, lecz o tej samej liczbie punktów.

[...] Rozmiar, miara i liczba są jedynie metaforami, aspektami zewnętrznego wyglądu, lecz nie należy ich mylić z jakimś ostatecznym niezmiennikiem - nie należy fetyszyzować.

W przypadku trójwymiarowej miary, objętości, istnieje jeszcze jeden aspekt, nad którym powinniśmy się zastanowić. Jest to zaskakujące i paradoksalne twierdzenie Banacha-Tarskiego, które mówi, że kula o dowolnych rozmiarach (promieniu) może zostać rozłożona, a następnie złożona ponownie w kulę o innych rozmiarach [...] elektron może zostać przekształcony w mion w skończonej liczbie kroków.

Przy założeniu, że materia jest dzisiaj uważana za pewien abstrakcyjny rozkład w matematycznej przestrzeni [...] mówimy tutaj o przestrzeni w bardziej organicznym, ujednoliconym i chaotycznym sensie. Nie jest to przestrzeń wadliwa lub niekompletna, lecz raczej inna od naszej - kolejna metafora.

Czy fizycy rozwiną te idee i stworzą nowy model standardowy, sięgający poza opis w kategoriach kwarków i QCD? Czy też przejdą one do historii jako ciekawostki naukowe, dziwaczne matematyczne cudeńka pozbawione fizycznego znaczenia? To się dopiero okaże. Augenstein porównuje kreowane przez fizyków opisy rzeczywistości do baśni i podkreśla, że musiałyby zajść poważne zmiany w poglądach i obyczajach fizyków, aby idea konstruowania modeli niemal na życzenie i z dowolnych elementów mogła zostać potraktowana poważnie. Zmiany takie nie zajdą z dnia na dzień, jeśli w ogóle nastąpią. Słychać tu echo konkluzji Pickeringa na temat sposobów opracowywania modeli przez fizyków. Niektórzy fizycy-filozofowie rozwijają te idee dalej, badając pochodzenie modeli i ujmowanie rzeczywistości przez fizyków. W gruncie rzeczy niektórzy fizycy podążają już w kierunku wskazanym przez Pickeringa i Augensteina, nie zawsze zdając sobie z tego sprawę.

Opisywanie nieopisywalnego

Zamoczywszy palec w mętnych wodach surrealistycznego basenu teorii zbiorów, chciałbym przytoczyć jeden przykład z kosmologii, zanim wrócimy do filozoficznych aspektów uprawiania fizyki.

Podobnie jak fizycy cząstek wyjaśniają mechanizmy funkcjonowania świata w małej skali za pomocą modelu kwarków i QCD, kosmolodzy mają swój model standardowy wszechświata w wielkiej skali, w którym główne role odgrywają materia, grawitacja i ogólna teoria względności. Jednym z najważniejszych problemów - być może najważniejszym - związanym z teorią wielkiego wybuchu, standardowego modelu kosmologicznego, jest obecność osobliwości w momencie powstania wszechświata. Astronomowie wiedzą, że wszechświat się rozszerza, gdyż z obserwacji nieba wynika, że galaktyki oddalają się od siebie. Ogólna teoria względności przewiduje, że przestrzeń pomiędzy galaktykami się rozszerza. Zarówno teoria, jak i dane obserwacyjne wskazują, że jeśli wyobrazimy sobie ten proces wstecz w czasie, aby zobaczyć, jak wszechświat wyglądał w przeszłości, to musimy dojść do momentu, gdy cała materia i cała czasoprzestrzeń we wszechświecie była skupiona w jednym punkcie - w osobliwości.

W osobliwości załamują się prawa fizyki w takiej formie, w jakiej je znamy. Jeśli potraktuje się równania dosłownie, to jest to punkt o zerowej objętości i nieskończonej gęstości, co robi wrażenie absurdu. W latach sześćdziesiątych Stephen Hawking i Roger Penrose pokazali jednak, że jeśli ogólna teoria względności stanowi poprawny opis funkcjonowania wszechświata (co w świetle dostępnych dowodów, łącznie z podwójnym pulsarem, wydaje się bardzo prawdopodobne), to nie ma ucieczki od osobliwości na początku czasu. Rozszerzanie się wszechświata, które obecnie obserwujemy, w połączeniu z równaniami Einsteina dowodzi, że na początku musiała być osobliwość.

Czy ta niepokojąca konkluzja nie wynika jednak z niewłaściwej analogii? W latach osiemdziesiątych Hawking wrócił do zagadki początków czasu, próbując wraz ze swoimi współpracownikami znaleźć sposób opisu wszechświata za pomocą modelu, w którym połączone zostały koncepcje mechaniki kwantowej i ogólnej teorii względności. Dla wielu kosmologów prace te stanowią dowód, że konieczny jest jakiś wariant teorii „wielu światów” lub „wielu historii”, gdyż nie ma sposobu, aby obserwator z zewnątrz mógł dokonać redukcji funkcji falowej wszechświata od superpozycji stanów do jednej historii. Podejście Hawkinga ma jednak jeszcze jedną intrygującą właściwość, dzięki której wielki wybuch ukazuje się nam w nieco innej perspektywie.

Wspomniałem już wcześniej, że zachodzi istotna różnica w sposobie traktowania przestrzeni w równaniach obu teorii względności. Powiedziałem, że czas występuje w nich ze znakiem minus, lecz w istocie jest nieco inaczej. W równaniach tych, podobnie jak w słynnym twierdzeniu Pitagorasa o trójkątach prostokątnych, występują kwadraty odległości. Parametrami, które reprezentują odległości przestrzenne w równaniach Einsteina, są kwadraty: x^2 , y^2 i z^2 . Parametrem, który reprezentuje czas, jest jednakże wielkość u i e m n a : $-t^2$. Z tego powodu czas nie może być potraktowany dokładnie w taki sam sposób jak przestrzeń. Wszyscy wiemy ze szkoły, że nie można obliczyć pierwiastka z liczby ujemnej. Jeżeli znamy x^2 , to x ma łatwe do zrozumienia znaczenie; na przykład pierwiastek kwadratowy z liczby 4 wynosi 2. Jeżeli jednak znamy $-t^2$, to co nam to mówi o t ? Ile wynosi pierwiastek kwadratowy na przykład z liczby m i n u s 9?

Hawking zwrócił uwagę, że problem osobliwości na początku wszechświata - na granicy czasu - może zostać rozwiązany za pomocą dosyć trywialnego narzędzia matematycznego. Matematycy od dawna znają pierwiastki kwadratowe z liczb ujemnych. Istnieją w ich arsenale od ponad dwustu lat i są często używane w rozmaitych sytuacjach. Uzyskano je za pomocą pewnego chwytu - wynaleziono liczbę, zwaną i , która jest zdefiniowana jako „pierwiastek kwadratowy z liczby minus jeden”. Tak więc i^2 wynosi -1 . Jeżeli teraz chcemy obliczyć pierwiastek kwadratowy z -9 , to mówimy, że -9 wynosi $(-i) \times 9$, czyli pierwiastek kwadratowy z -9 jest równy pierwiastkowi kwadratowemu z -1 pomnożonemu przez pierwiastek kwadratowy z 9 , co daje w rezultacie ix 3. Takie „liczby urojone” mogą występować we wszystkich operacjach, w których występują zwykłe liczby - w dodawaniu, odejmowaniu, mnożeniu, dzieleniu i wszystkich innych. Są one ważnym narzędziem wielu gałęzi matematyki, pozwalającym matematykom opisywać nieopisywalne - świat pierwiastków z liczb ujemnych. Operuje się nimi analogicznie do zwykłych „liczb rzeczywistych”.

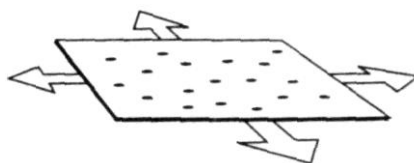
Śmiały pomysł Hawkinga polegał na uznaniu naszego zwykłego rozumienia czasu za błędne i wprowadzeniu czegoś, co nazwał on czasem urojonym, $i \times t$. Pozwala to stworzyć model funkcjonowania wszechświata, który sprawdza się lepiej w pobliżu osobliwości. Matematycznie jest to trywialna operacja, formalnie nie różniąca się od zmiany odwzorowania stosowanego przez kartografów do tworzenia map powierzchni Ziemi. Tradycyjne odwzorowanie Merkatora pozwala mniej więcej zachować kształty kontynentów, lecz zniekształca ich względne rozmiary, natomiast odwzorowanie Petersa, stworzone w latach siedemdziesiątych, pokazuje kontynenty w poprawnych proporcjach, lecz nie zachowuje ich kształtów. Oba odwzorowania (a także wszystkie inne odwzorowania kartograficzne) przekształcają sferyczną powierzchnię globu na płaską powierzchnię kartki papieru. W żaden sposób nie można jednak przekształcić powierzchni sfery na powierzchnię płaską, nie zniekształcając jej, więc o żadnym z powyższych odwzorowań nie da się powiedzieć, że jest „poprawne”, a o innych, że są „niepoprawne”. Są po prostu różne.

Na podobnej zasadzie matematycy mogą wybrać dowolny układ odniesienia, w którym opisują wydarzenia w przestrzeni i w czasie. Aby posłużyć się jeszcze jednym przykładem z geografii - wybór południka Greenwich jako punktu odniesienia w pomiarach długości geograficznej był historycznym przypadkiem. Równie dobrze nawigatorzy mogliby wybrać którykolwiek z pozostałych południków, wyimaginowanych linii łączących biegun północny i południowy naszej planety, jako „południk zerowy”.

Zaproponowane przez Hawkinga przejście do „czasu urojonego” nie jest aż tak proste, jak się wydaje, lecz polega ono wyłącznie na zmianie współrzędnych matematycznych. Istotnym efektem tej zmiany jest ustawienie parametru czasu w równaniach Einsteina w jednym rzędzie z parametrami przestrzennymi. Jeżeli będziemy mierzyć czas w jednostkach $i \times t$, to po podniesieniu do kwadratu uzyskamy jednostki $i^2 \times t^2$, czyli po prostu $(-1) \times t^2$ lub $-t^2$. Teraz musimy pomnożyć to przez znak minus zawarty w samych równaniach Einsteina, w wyniku czego minusy się kasują (pamiętamy stare powiedzenie: „dwa minusy dają plus”) i zostanie nam samo t^2 .

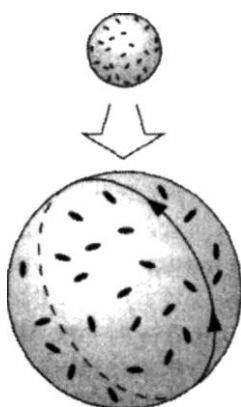
Ta zmiana modelu, lub wybór odmiennej analogii matematycznej, powoduje w efekcie, że czas staje się d o k ł a d n i e równorzędny przestrzeni, przynajmniej z punktu widzenia równań Einsteina. Okazuje się przy tym, że ta niepozorna operacja matematyczna usuwa z równań osobliwość.

Rozszerzającego się wszechświata, zdaniem Hawkinga, nie powinniśmy wyobrażać sobie jako bąbla czasoprzestrzeni, który wyrasta z matematycznego punktu (osobliwości) i rośnie, lecz raczej jako serię równoleżników na powierzchni sfery o stałym promieniu. Mały okrąg wokół bieguna północnego przedstawia młody wszechświat - cała przestrzeń jest zawarta w linii tworzącej okrąg. Gdy wszechświat się rozszerza, to reprezentują go kolejne, coraz dalsze od bieguna i coraz większe okręgi. Ruch od bieguna w kierunku równika przedstawia upływ czasu. Gdy okrąg przekracza równik, to wszechświat zaczyna się ponownie kurczyć i w miarę mijania równoleżników położonych coraz dalej na południe staje się coraz mniejszy, aż w końcu znika na biegunie południowym.

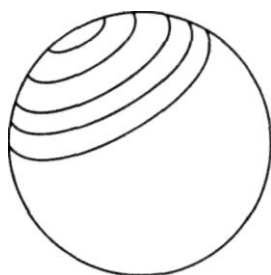


Ryc. 22. Rozszerzający się wszechświat można porównać do gumowej powierzchni rozciąganej równocześnie we wszystkich kierunkach. Kropki przedstawiają galaktyki. Galaktyki oddalają się, ponieważ przestrzeń między nimi się rozszerza - a nie dlatego, że poruszają się w przestrzeni

Co jednak dzieje się na samych biegunach - na początku i na końcu czasu? W punktach tych nie ma krawędzi sfery, mimo że czas zaczyna się na biegunie północnym, a kończy na południowym. Czas jest teraz dokładnie równoważny przestrzeni i analogia z geografią planety Ziemia staje się idealna. Na biegunie północnym wszystkie kierunki są południowe i nie istnieje kierunek północny - lecz nie ma tam krawędzi planety. Na biegunie północnym stworzonego przez Hawkinga modelu wszechświata wszystkie kierunki czasu odpowiadają przyszłości i nie istnieje kierunek odpowiadający przeszłości - lecz nie ma tam krawędzi czasu. Problem osobliwości nie pojawia się.



Ryc. 23. Być może wszechświat jest zamknięty. Można go porównać do powierzchni powiększającej się bańki mydlanej. Kropki przedstawiają galaktyki, podobnie jak na rycinie 22. Mamy wtedy do czynienia z zadziwiającą możliwością - można odbyć podróż dookoła wszechświata i powrócić do punktu wyjścia, poruszając się cały czas wzdłuż linii prostej, na tej samej zasadzie jak podczas podróży wokół Ziemi



Ryc. 24. W wersji Stephena Hawkinga zarówno przestrzeń, jak i czas (wszystkie cztery wymiary) są reprezentowane przez powierzchnię sfery. Wszechświat ma swój początek jako mały okrąg wokół „bieguna północnego” w chwili zero, a następnie rozszerza się, stając się coraz większym okręgiem, aż dochodzi do „równika”. Następnie zaczyna się kurczyć w kierunku „bieguna południowego” i w miarę upływu czasu staje się coraz mniejszy. Nie istnieje jednak „krawędź” czasu, podobnie jak nie istnieje „krawędź świata” na biegunie północnym Ziemi. Ta analogia ma na celu pokazanie, dlaczego nie ma sensu mówienie o czasie „przed wielkim wybuchem” lub „po śmierci wszechświata”

Gdybyśmy mogli podróżować wstecz w czasie aż do wielkiego wybuchu, to nie zniknęlibyśmy w osobliwości, lecz przekroczylibyśmy punkt (moment) „czasu zero” i okazałoby się, że ponownie podążamy w kierunku przyszłości, tak samo, jak osoba, która znajduje się niedaleko od bieguna północnego Ziemi i porusza się na północ. Po minięciu bieguna okaże się, iż podąża na południe, mimo że nie zmieniła kierunku ruchu. Wszechświat w tym modelu jest całkowicie samowystarczalnym obszarem czasoprzestrzeni i masy-energii, rozszerzającym się z niczego i kurczącym ponownie w nicość.

Wszystko to jest rezultatem prostego przekształcenia współrzędnych, dzięki któremu współrzędne czasowe i przestrzenne stają się równorzędne. W matematycznym żargonie liczby związane z t są tradycyjnie nazywane liczbami urojonymi, co jest o tyle niefortunne, że alternatywna współrzędna czasowa Hawkinga nosi nazwę czasu urojonego. Wydaje się to jak z powieści fantastycznonaukowej lub z *Alicji w krainie czarów*¹¹⁷, lecz w rzeczywistości jest matematycznie poprawnym sposobem potraktowania problemu, który zresztą z fizycznego punktu widzenia robi wrażenie b a r d z i e j uzasadnionego niż tradycyjne podejście, gdyż pozwala pozbyć się uciążliwej osobliwości.

Można to ująć jeszcze inaczej. Hawking upodobił czas do przestrzeni, „uprzestrzenił” go. Ilya Prigogine powiedział kiedyś, że jego podejście, traktując akt stworzenia jako coś, co zachodzi wszędzie w czasoprzestrzeni, w jakimś sensie jest równocześnie równoważne „uczasowieniu” przestrzeni. Nie chcę zagłębiać się w szczegóły, lecz jedynie zwrócić uwagę na fakt, że rozwiązanie problemu osobliwości proponowane przez Hawkinga mieści się w duchu koncepcji Augensteina, zgodnie z którą wszystko w matematyce może być przełożone na fizycznie sensowny model rzeczywistości. Fizyka jest pracą w takim samym sensie jak praca stolarza, który produkuje przedmioty z surowca. Stolarz robi meble z drewna, a fizyk tworzy modele świata z matematyki. Kto odgadłby dwieście lat temu, gdy badania liczb urojonych były kwitnącą dziedziną czystej matematyki, że któregoś dnia zostaną one użyte do wyjaśnienia początków wszechświata?

Zastosowanie to musiało oczywiście zaczekać na moment, gdy fizycy i astronomowie stworzyli koncepcję, czy też model, w ramach którego problem ten został postawiony w taki sposób, że rozwiązanie w kategoriach liczb urojonych stało się oczywiste. Zatem w jaki sposób fizycy doszli do obecnego modelu rzeczywistości?

Jak uchwycić rzeczywistość

W jaki sposób fizycy odkrywają (lub wynajdują) modele rzeczywistości? Jedno z najnowszych i najbardziej przekonujących wyjaśnień przedstawił Martin Krieger z University of Southern California w intrygującej książce *Doing Physics*. Analizował on poszczególne analogie i modele stworzone w drugiej połowie dwudziestego wieku i pokazał, jak bardzo są one zakorzenione we współczesnej kulturze (w szczególności, dla tego konkretnego okresu historii - w kulturze Stanów

¹¹⁷ Ten wybór terminologii jest podwójnie niefortunny, gdyż w gruncie rzeczy Hawking traktuje czas tak jak urojoną p r z e s t r z e ń : t w równaniach gra taką samą rolę jak x , y lub z .

Zjednoczonych) i powiązane z analogiami i modelami stosowanymi przez poprzednie pokolenia. Podobieństwo QCD do QED i przez nią do równań Maxwella stanowi najbardziej oczywisty przykład. W książce Kriegera pobrzmiewają echa prac, w których niektórzy filozofowie - w szczególności Karl Popper, od lat trzydziestych¹¹⁸ - analizowali pracę uczonych w dwudziestym wieku. Krieger jest z wykształcenia fizykiem, co powinno zachęcić innych fizyków do wysłuchania jego wersji, która jest zarówno aktualna, jak i wyjątkowo przekonująca.

Zapewne za przyczyną swego wykształcenia Krieger posługuje się terminologią fizyczną, lecz tłumaczy ją na potoczny język. Gdy na przykład fizyk opisałby właściwości układu w kategoriach „stopni swobody”, Krieger nazywa te właściwości „uchwyty”, dzięki którym możemy „złapać” układ i próbować poznać, jak on wygląda. Prosty przykładem jest temperatura gazu wypełniającego pudło. Jest to jeden ze stopni swobody, którego znajomość stanowi informację o stanie gazu w pudle. Innym przykładem stopnia swobody może być położenie pojedynczego atomu, lecz do poznania temperatury gazu nie jest konieczna znajomość położenia wszystkich atomów. Nie próbując określić, jaki „rzeczywiście” świat jest, Krieger podkreśla, że wszystko opiera się na analogii, i przedstawia, w jaki sposób fizycy „łapią” świat (korzystając z uchwytów, których rolę grają stopnie swobody) i opisują go. Świat może być „podobny” do wielu rzeczy - fal, kul bilardowych, do czegośkolwiek - lecz w istocie n i e j e s t żadną z nich. W analizach Kriegera analogie odgrywają jednak znacznie istotniejszą rolę niż w przykładach, które przedstawiłem powyżej. Interesujące jest porównanie działania subatomowego świata do funkcjonowania fabryki lub do gospodarki państwa. Zewnętrzny obserwator badający sposób, w jaki surowce trafiają do fabryki, a gotowe produkty ją opuszczają, nie może zobaczyć samego procesu produkcji, ponieważ jest on ukryty wewnątrz budynków. Może jednak wyciągać wnioski na podstawie porównania tego, co widzi na wejściu do fabryki i na wyjściu z niej. Ściany zasłaniają szczegóły procesu produkcji - ukrywają stopnie swobody - i redukują fabrykę do czarnej skrzynki. Obserwator widzi jedynie, że określony surowiec na wejściu daje określone produkty na wyjściu. Sytuacja jest, zdaniem Kriegera, analogiczna do tej, z jaką mamy do czynienia w przypadku chmury elektronowej wokół atomu, która odpowiada za chemiczne właściwości atomu i która zasłania wewnętrzne szczegóły atomu. W reakcjach chemicznych istotny jest tylko sposób oddziaływania zewnętrznych elektronów z zewnętrznymi elektronami innych atomów. Nie musimy wiedzieć nic o tym, co utrzymuje sam atom w całości.

Ściany są istotne, gdyż upraszczają złożone problemy i pozwalają tworzyć fizykę bez znajomości wszystkich szczegółów danego układu. Fizycy wynajdują więc ściany. Chodzi o to, żeby upewnić się, czy mamy właściwy rodzaj ścian. W rezultacie ukrywają oni tak wiele stopni swobody, jak to jest możliwe, i badają efekty powstające w wyniku zmian pozostałych kilku stopni swobody, czyli łapią układ za pomocą pozostałych „uchwytów” i patrzą, co się dzieje, gdy się nim potrząsa.

¹¹⁸ Zob. np.: K. Popper, *The Logic of Scientific Discovery*, Hutchinson, London 1959 [wyd. pol.: *Logika odkrycia naukowego*, przeł. U. Niklas, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1977].

Dobrym przykładem jest temperatura. W wielu eksperymentach z zamkniętym w pudle gazem fizycy najpierw czekają, aż temperatura gazu ustabilizuje się na jakiejś konkretnej wartości, czyli aż gaz znajdzie się w „równowadze termodynamicznej”. Wtedy nie trzeba już się martwić o temperaturę, gdy bada się jakieś inne właściwości gazu, na przykład zmianę ciśnienia wywołaną przez zmniejszenie objętości pudła do połowy (w praktyce w trakcie takiego eksperymentu pudło musi być połączone z dużym obiektem - z „rezerwuarem” ciepła lub z „otoczeniem” - aby jego własna temperatura nie uległa zmianie na skutek sprężania). Gdyby sprężanie zostało wykonane w tym samym momencie, gdy gaz był podgrzewany z zewnątrz, to znacznie trudniej byłoby rozwickłać wszystkie zmieniające się stopnie swobody i stworzyć obraz tego, co się dzieje z gazem. Jeżeli wybierze się właściwe stopnie swobody, to fizyka staje się prosta, lecz przy błędnym wyborze sytuacja może stać się bardzo trudna do odtworzenia. Jak powiedział Steven Weinberg, „do opisanie układu fizycznego możesz użyć takich stopni swobody, jakich chcesz, lecz jeżeli użyjesz niewłaściwych, to będziesz żałował”¹¹⁹.

Rozszerzając analogię z fabryką, Krieger porównuje koncepcje fizyków dotyczące cząstek do pojedynczych robotników w fabryce wraz z ich cechami osobowymi - umiejętnościami, możliwościami przekwalifikowania oraz żądaniami płacowymi. Cechy robotników opisują etykiety, jakimi opatrujemy cząstki. Etykiety te identyfikują między innymi ładunki, masy i siły reakcji na oddziaływanie. „Cząstki - mówi Krieger - są tak zaprojektowane, że można je zlokalizować i oddzielić, są stabilne, obiektywne, nazwane i zindywidualizowane”¹²⁰. Zgodnie z tym punktem widzenia sytuacja nie polega na tym, że fizycy zgłębiają świat subatomowy i znajdują cząstki, lecz z góry zakładają koncepcję bilardowych kulek i zadają takie pytania (wybierają takie stopnie swobody), na które padają odpowiedzi w języku cząstek.

Możemy się zastanawiać, czy nasze koncepcje kul bilardowych lub ścian, oparte na codziennym doświadczeniu, nie wprowadzają nas w błąd, gdy próbujemy dopasować naturę do naszych naiwnych intuicji. To całkiem możliwe, lecz imponujący jest fakt że modyfikujemy nasze naiwne intuicje, ucząc się dostrzegać właściwe cechy przedmiotów należących do naszego codziennego środowiska i modelując za ich pomocą naturę.

Dobrym przykładem jest kwantowa właściwość zwana spinem. Gdy fizycy odkryli, że oprócz masy i ładunku elektron potrzebuje jeszcze jednej etykiety, stworzyli analogię z rotacją kuli bilardowej. Analogia nie jest ścisła, gdyż okazało się, że jeżeli potraktuje się elektron jako wirującą cząstkę, to aby powrócić do pierwotnego położenia, musi ona obrócić się o 720 stopni (d w a

¹¹⁹ Cytowane za: M. Krieger, *Doing Physics*, s. 30.

¹²⁰ Cytaty ten i następny pochodzą z: M. Krieger, *Doing Physics*, s. 22-23.

pełne obroty), a nie o 360 stopni¹²¹. Fizycy nauczyli się jednak myśleć o tej dziwacznej właściwości elektronu jako o analogii wirującej kuli bilardowej lub rotacji Ziemi.

Trzecim, oprócz ścian i robotników, elementem świata fizyków jest pole. Pole stanowi dokładną antytezę cząstki - jest rozmyte, a nie zlokalizowane, płynnie się zmienia w odróżnieniu od posiadającej wyraźną granicę cząstki. Pola są jednak zawsze związane z cząstkami. Krieger zwraca uwagę, że „idealna” cząstka byłaby całkowicie samowystarczalna i nie posiadałaby żadnych uchwytów, za pomocą których moglibyśmy nią potrząsać. Tylko dlatego, że z cząstek wycieka pole grawitacyjne, elektromagnetyczne lub jakiegokolwiek, w ogóle wiemy o ich istnieniu.

To nadal nie oznacza jednak, że pole jest realne ani że cząstki są realne, ani że elektron rzeczywiście wiruje wokół własnej osi jak bąk. Lub inaczej - tak jak ja to widzę - w s z y s t k i e modele są realne, nawet jeżeli są niekompletne. Jak mówi Krieger: Czy istnieje jakaś inna rzeczywistość oprócz modeli? Podobnie jak Pickering Krieger rozważa sposób, w jaki fizycy uczą się swego fachu i osiągają postępy, naśladowując techniki, które okazały się tak skuteczne w przeszłości (jedną z najbardziej skutecznych technik jest założenie, że wszystko składa się z mniejszych elementów). Omawia także siłę analogii z mechanizmem zegarowym, zwracając uwagę (s. 33), że „zegar realizuje znacznie mniej (aczkolwiek zapewne bardziej interesujących) funkcji niż poszczególne jego elementy oddzielnie” - jeszcze jeden dowód na to, że ograniczenie liczby stopni swobody może być pożyteczne. Nie rozważa jednak szczegółowo sposobu, w jaki Maxwell uzyskał swoje słynne równania falowe przez pośredni etap polegający na analizie przypominającego zegar układu oddziałujących trybów i kół zębatych.

Zgodnie z tradycją etap ten jest traktowany jako pomocniczy, podobnie jak laska, którą pacjent może odrzucić, gdy nauczy się chodzić bez niej. Faktem jest jednak, że analiza ta okazała się skuteczna. Być może jest ona nużąca i nieatrakcyjna, lecz stanowi poprawny model propagacji fal elektromagnetycznych. Teoria pola jest „lepiej”, ponieważ sprawia wrażenie prostszej i bardziej bezpośredniej, lecz model zegarowy działa i - nawet jeżeli robi wrażenie brzydkiego i topornego - przypomina nam, że najładniejsze analogie niekoniecznie stanowią jedyną prawdę o funkcjonowaniu świata. Gdy fizycy mówią, że przyroda funkcjonuje w jakiś określony sposób, to według Kriegera mają na myśli to, że właśnie ich model może w ten sposób funkcjonować, nie naruszając żadnych reguł.

Oto jeszcze jeden przykład powszechnie odrzuconej, lecz nadal słusznej metafory. Gdy mówiłem o kreacji par elektron-pozyton z samej energii, to analizowałem ten proces w kategoriach konwersji energii w masę zgodnie z równaniem $E = mc^2$. Gdy Paul Dirac w latach dwudziestych po raz pierwszy rozważał możliwość istnienia cząstek, które obecnie nazywamy antycząstkami, stworzył odmienny model. W jego wersji rzeczywistości „nicość” próżni jest wypełniona przez morze elektronów, a każdy możliwy ujemny poziom energii jest zajęty. Nie widzimy tych elektronów, ponieważ są one wszędzie i nie dają się odróżnić od otoczenia. Jeżeli ścianę

¹²¹ Richard Feynman (*Elementary Particles and the Laws of Physics*, s. 29) podał wyborny przykład ilustrujący, jak za pomocą dwóch obrotów powrócić do wyjściowego położenia, używając jako modelu filiżanki herbaty.

pomalujemy na jednolity kolor (powiedzmy czerwony), to każdy punkt ściany będzie tak samo czerwony jak wszystkie inne i żaden nie będzie się wyróżniał. Zwykły (o dodatniej energii) elektron jest „zauważalny”, ponieważ odróżnia się od otoczenia, jak niebieska kropka na czerwonym tle.

Zgodnie z tą interpretacją powstanie pary elektron-pozyton zachodzi wtedy, gdy foton o dostatecznie dużej energii uderzy w jeden z elektronów z ujemnego morza i dostarczy mu dostatecznie dużo energii, aby wypchnąć go do dodatniego stanu energii. Elektron staje się wtedy rzeczywistym elektronem w rzeczywistym świetle (niebieską kropką), lecz zostawia dziurę w morzu elektronów o ujemnych energiach (białą kropkę na czerwonym tle). Dziura ta ma wszystkie właściwości elektronu z dodatnim ładunkiem - pozytonu. Jeżeli na przykład w okolicy znajduje się dodatni ładunek elektryczny, to wszystkie elektrony z ujemnego morza będą próbować się poruszać w jego kierunku. W tych miejscach, gdzie stoją one ramię w ramię, nie mogą się poruszyć, lecz elektron znajdujący się tuż obok dziury może zmienić pozycję, wskakując do niej i zostawiając po sobie puste miejsce. Na to puste miejsce wskoczy następny elektron i tak dalej. W efekcie dziura będzie oddalać się od dodatniego ładunku dokładnie tak jak odpychana dodatnio naładowana cząstka. W ujemnym morzu cząstek b r a k elektronu jest elementem wyróżniającym się od otoczenia, „ostrą granicą”, która należy do charakterystycznych cech cząstki. Dziura istnieje i zachowuje się jak cząstka, dopóki nie wpadnie do niej elektron o dodatniej energii, wydzielając przy okazji promieniowanie elektromagnetyczne. Podobnie jak tryby i zębatki Maxwella powyższy model jest obecnie uważany za etap pośredni na drodze do prawdziwego obrazu kreacji cząstek z energii. Jest to jednak całkowicie rozsądny i spójny model, który może być użyty jako podstawa do obliczeń i który może poprawnie przewidywać mierzone w eksperymentach właściwości pozytonów. Pamiętajmy przy tym, że istnieje jeszcze jeden zadowolający model, który tłumaczy pozytony jako elektrony poruszające się wstecz w czasie. Wypełniony elektronami o ujemnej energii wszechświat może budzić w nas zaniepokojenie, lecz jest to nasz problem, a nie wszechświata. Możemy dowolnie wybierać stopnie swobody, które chcemy badać, i wybór ten determinuje właściwości, które przypisujemy przyrodzie. W s z y s t k o w fizyce jest analogią. Dopóki konstruowane przez nas modele są spójne i pozwalają formułować przewidywania, które można testować i weryfikować eksperymentalnie, dopóty mamy całkowitą swobodę wyboru takich analogii i takich stopni swobody, na jakie mamy ochotę. Stwierdzenie to prowadzi nas z powrotem do pytania, która z wielu interpretacji kwantowych, jeśli w ogóle którakolwiek, może być uważana za „najlepszą ofertę”.

Hurtownia kwantowej rzeczywistości

Wydaje mi się, że najlepszym wyjściem byłby zakup wszystkich wersji. Każda z interpretacji jest dobrym modelem i każda daje nam użyteczne informacje na temat funkcjonowania świata. Zupełnie rozsądnie jest uważać każdą interpretację za niezależny stopień swobody. Zgodnie ze stwierdzeniem Weinberga mamy możliwość wyboru tej z nich, która najbardziej nam odpowiada w danej sytuacji. Jeżeli wybierzemy niewłaściwą, to będziemy żałować - gdy na przykład spróbujemy zastosować interpretację kopenhaską do analizy losów kota Schrodingera. Jeżeli jednak

wyberzemy właściwą - w tym wypadku teorię wielu światów - to wszystko staje się proste i jasne. Dobry fizyk powinien nosić wszystkie interpretacje kwantowe w swojej skrzynce z narzędziami i w każdej sytuacji - w obliczu określonej zagadki kwantowej - stosować właściwe narzędzie.

Oto krótki przegląd niektórych propozycji wraz z ich analizą w kontekście twierdzenia Bella, najważniejszego odkrycia fizyki kwantowej drugiej połowy dwudziestego wieku. Każda akceptowalna wersja kwantowej rzeczywistości musi być zgodna z wynikami eksperymentu Aspecta - i wszystkie są z nią zgodne!

Interpretacja kopenhaska, nasza dobra znajoma, nie czuje się zakłopotana twierdzeniem Bella i eksperymentem Aspecta, ponieważ Niels Bohr i jego koledzy na samym początku orzekli, że wynik eksperymentu zależy od całego układu. Jeżeli w doświadczeniu z dwiema szczelinami obie są otwarte, to pojawia się interferencja; jeżeli tylko jedna szczelina jest otwarta, to interferencji nie ma. A jeżeli układ doświadczalny zawiera fotony znajdujące się na dwóch przeciwległych krańcach galaktyki, to musimy je oba uwzględnić, nawet jeżeli wymaga to „widmowego działania na odległość”. Ponadto, jeżeli proces pomiaru kreuje rzeczywistość, to wyniki doświadczenia Aspecta należy rozumieć w ten sposób, że rzeczywistość jest kreowana nie tylko w bezpośredniej bliskości eksperymentu, lecz także w miejscach, do których nie zdążyłyby jeszcze dotrzeć sygnały świetlne.

Mówiąc inaczej, świat może być „rzeczywiście rzeczywisty”, w takim sensie, w jakim rozumieją to David Bohm i jego naśladowcy. Wtedy jednak świat musi być niepodzielną całością, przez co bodziec zlokalizowany w jednym miejscu powoduje reakcję w innych miejscach, nielokalnie i w sposób natychmiastowy. Zarówno w tej interpretacji, jak i w pokrewnej koncepcji podlegającej statystycznym prawom fali pilotującej (która steruje zachowaniem rzeczywistych cząstek obdarzonych rzeczywistymi właściwościami) natychmiastowa „komunikacja” wpływa na wyniki eksperymentów, uwzględniając stan całej reszty wszechświata, lecz mimo to nie dopuszcza do transmisji szybszych od światła sygnałów zawierających informację użyteczną z punktu widzenia ludzkich obserwatorów.

Interpretacja wielu światów należy do nieco innej kategorii, ponieważ dopuszcza realność wszystkich możliwych wyników wszystkich możliwych eksperymentów. Jak już wspomniałem, z pewnością nie jest ona lokalna, ponieważ rezultaty procesu kwantowego, który zaszedł na Ziemi, wpływają na tworzenie wielokrotnych kopii rzeczywistości w odległych galaktykach w sposób natychmiastowy (a zmiany zachodzące w tych galaktykach powodują, że rzeczywistość na Ziemi rozszczepia się natychmiast na wielokrotne kopie). Mimo to jest to spójna i skuteczna interpretacja kwantowej rzeczywistości.

John Bell, rozważając konkurencyjne interpretacje teorii kwantowej, ustawia całą rzecz w odpowiedniej perspektywie:

Do jakiego stopnia wszystkie te możliwe światy są fikcją? Przypominają fikcję literacką w tym sensie, że są swobodnymi tworem ludzkiego umysłu. W fizyce teoretycznej czasami wiadomo z góry, że praca jest fikcją, na przykład w sytuacji, gdy rozważa się uproszczony model świata w jednym lub w dwóch wymiarach zamiast trzech. Znacznie częściej fikcja pojawia się dużo

później, dopiero gdy hipoteza okazuje się błędna. Fizyk, który nie zajmuje się uproszczonymi modelami i traktuje serio swoją pracę, tym różni się od powieściopisarza, iż spodziewa się, że być może jego historia jest prawdziwa¹²².

Jednak nadzieje te są z góry skazane na niepowodzenie. W s z y s t k i e modele są uproszczone na skutek wyboru stopni swobody, za pomocą których próbujemy uchwycić rzeczywistość. Zarazem wszystkie modele świata znajdującego się poza bezpośrednim zasięgiem naszych zmysłów są fikcją, swobodną twórczością ludzkiego umysłu. Możemy wybrać tę interpretację, która najbardziej przypadła nam do gustu, odrzucić wszystkie lub kupić cały zestaw i stosować różne wersje w różnych sytuacjach - zależnie od uznania, dnia tygodnia lub kaprysu. Rzeczywistość jest w dużej mierze taka, jaka chcemy, aby była.

Mimo to niemal każdy chce znać odpowiedzi. Fizycy nie ustają w poszukiwaniach r e a l n y c h modeli i czynią to z taką samą pasją, z jaką inni ludzie studiują filozofię lub poświęcają się religii. Ja sam nadal odczuwam to pragnienie, mimo że logiczna część mojego umysłu mówi mi, że poszukiwania są bezowocne i że wszystko, na co możemy liczyć, to jedynie spójny mit na miarę naszych czasów. Tak więc mimo wszystko przedstawię koncepcję, którą uważam za najlepszą ofertę na dzisiejszym rynku interpretacji kwantowych. Jest to idea, która nie tylko uwydatnia całą kwestię nielokalności, lecz także daje zestaw analogii i metafor, które - moim zdaniem - w niedługim czasie zmienią sposób widzenia świata przez fizyków.

W książce *Doing Physics* Martin Krieger wspomniał wiele analogii, które okazały się użyteczne w zrozumieniu tego, jak pracują fizycy. W jego dyskusji pojawiają się fabryka, robotnicy, gospodarka, mechanizmy zegarowe, a nawet systemy pokrewieństwa. Ale we wstępie (s. XIX) stwierdza on, że „wydaje się, iż inne znane analogie, takie jak ewolucja i organizm, odgrywają w fizyce mniej istotną rolę”.

Moim zdaniem jest to historyczne przeoczenie, które obecnie zaczynamy naprawiać. Jak pokazałem w mojej książce *In the Beginning*, traktując obiekty takie jak galaktyki, a nawet cały wszechświat, tak jakby były one żywymi, ewoluującymi organizmami, astronomowie i kosmolodzy odkrywają nowe aspekty natury świata, jego pochodzenia i jego ostatecznego przeznaczenia. Kluczowe koncepcje związane z funkcjonowaniem istot żywych pojawiają się także w mojej ulubionej fikcji kwantowej -tak zwanej interpretacji transakcyjnej. Nie twierdzę bynajmniej, że jest ona czymś więcej niż fikcją; wszystkie modele naukowe są prostymi Kiplingowskimi „takimi sobie bajeczkami”, które dają nam poczucie zrozumienia tego, co jest grane, lecz niekoniecznie dają ostateczne odpowiedzi na temat wszechświata. Jeśli czytelnik pragnie opowieści, w którą może wierzyć przez dłuższą chwilę, przynajmniej do momentu, gdy zostanie ona zastąpiona przez coś lepszego (lub po prostu modniejszego), to polecam interpretację transakcyjną. Nadszedł czas, by wciągnąć flagę na maszt i dołączyć do tych czytelników, którzy rozstali się z nami po Prologu. Oto wersja rzeczywistości, która faktycznie odziera świat kwantów ze wszystkich jego tajemnic.

¹²² J.S. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, s. 194-195.

Epilog

Rozwiązanie - mit naszych czasów

Głównym problemem, który musimy wyjaśnić, aby się przekonać, czy rozumiemy tajemnice kwantowego świata, jest zagadka zawarta w opowieści o kotkach Schrödingera, którą opowiedziałem w prologu. Pamiętamy, że eksperyment został tak ustawiony, aby oba kotki zostały oddzielone w przestrzeni, lecz pozostały pod wpływem 50% fali prawdopodobieństwa związanej z redukcją funkcji falowej elektronu, który ma stać się „realną” cząstką w jednej i tylko jednej z dwóch kosmicznych kapsuł. W chwili gdy jedna z kapsuł zostanie otworzona i inteligentny obserwator stwierdzi, że znajduje się w niej elektron, fala prawdopodobieństwa zredukuje się i los kotka zostanie przypieczętowany - nie tylko tego kotka, który znajduje się w danej kapsule, lecz także drugiego, który oddalił się na drugi koniec wszechświata.

W każdym razie taką wykładnię korelacji między dwoma kotkami daje standardowa interpretacja kopenhaska. Niezależnie od tego, którą interpretację wybierzemy, eksperyment Aspecta i nierówności Bella pokazują, że obiekty kwantowe, które raz zostały połączone oddziaływaniem, zachowują się tak, jakby na zawsze stawały się elementami jednego układu, w którym zachodzi Einsteinowskie „widmowe działanie na odległość”. Całość jest większa od sumy części, a części całości są połączone sprzężeniami zwrotnymi, które wydaje się, że działają natychmiastowo.

W tym miejscu można poczynić pożyteczną analogię z żywymi organizmami. Żywy układ, taki jak ciało człowieka, jest z pewnością większy niż suma jego części. Ludzkie ciało składa się z milionów komórek, lecz jest ono zdolne do czynności, których w żadnym razie nie potrafiłyby wykonać zbiór złożony z odpowiedniej liczby oddzielnych komórek. Komórki są żywe same w sobie i potrafią wykonywać czynności, których nie potrafiłyby wykonać prosta mieszanina pierwiastków chemicznych składających się na komórkę. Jednym z kluczowych powodów, dla których żywe komórki i żywe ciała potrafią robić tyle interesujących rzeczy, jest fakt istnienia sprzężeń zwrotnych - od jednej strony komórki do drugiej i od jednej części ciała do drugiej. Na poziomie komórki sprzężenia te mogą być realizowane przez chemiczny transport surowców, z których budowane są skomplikowane molekuly życia. Na poziomie organizmu człowieka jako całości niemal każde rutynowe działanie - takie na przykład, jak ruch moich palców naciskających odpowiednie klawisze klawiatury komputera, aby napisać to zdanie - wymaga istnienia sprzężeń zwrotnych, dzięki którym mózg nieustannie odbiera sygnały od zmysłów wzroku i dotyku, i na ich podstawie modyfikuje zachowanie ciała (w tym wypadku określa, w którą stronę poruszyć palcami).

Proces ten ma charakter sprzężenia zwrotnego, a nie po prostu polecenia wydawanego palcom przez mózg. Cały układ jest zaangażowany w określanie aktualnego położenia palców, ich prędkości (i kierunku) poruszania się, korygowania nacisku na klawisze, ruchu wstecz (co w moim wypadku bardzo często się zdarza!), aby poprawić błędy. Nawet zawodowa maszynistka (osoba,

która potrafi pisać, nie patrząc na klawisze) wciąż precyzyjnie koryguje ruchy swoich palców w odpowiedzi na sygnały zwrotne, podobnie jak człowiek jadący na rowerze nieustannie dokonuje automatycznie korekty swojej równowagi, aby utrzymać pionową postawę. Jeżeli nic nie wiedzielibyśmy o istnieniu sprzężeń zwrotnych oraz układu komunikacyjnego łączącego różne części ciała, to wydawałoby się nam cudem, że zbudowane z mięsa i kości zakończenia moich rąk potrafią „stworzyć” inteligentną wiadomość, stukając w klawiaturę, podobnie jak wydaje nam się cudem to - chyba że założymy istnienie jakiejś formy sprzężenia zwrotnego i komunikacji - że stany polaryzacji dwóch fotonów wybiegających w dwie strony z atomu mogą być skorelowane w taki sposób, jak pokazał eksperyment Aspecta. Jediną poważną różnicą i przeszkodą w zrozumieniu tego jest fakt, że komunikacja w świecie kwantów odbywa się w sposób natychmiastowy. Można to jednak wytłumaczyć naturą światła, zarówno w kontekście teorii względności, jak i - w odpowiednim ujęciu - kwantowej natury elektrodynamiki. Takim odpowiednim ujęciem jest pozostający dotąd w cieniu model promieniowania elektromagnetycznego Wheelera-Feynmana, który ponadto pozwala dużo lepiej zrozumieć naturę grawitacji.

Bezwładność i masa

Model zaproponowany przez Feynmana ponad pół wieku temu sugeruje, że zachowanie promieniowania elektromagnetycznego i jego oddziaływanie z naładowanymi cząstkami można by wyjaśnić, uwzględniając fakt, że istnieją dwa zestawy rozwiązań równań Maxwella. Jeden z nich, zestaw „rozsądny”, opisuje fale poruszające się w przód w czasie i oddalające się od przyspieszanej cząstki - podobnie jak zmarszczki na wodzie oddalają się od miejsca, w które wpadł wrzucony do jeziora kamień. Drugi zestaw rozwiązań, powszechnie ignorowany nawet dzisiaj, opisuje fale poruszające się wstecz w czasie i zbiegające się w miejscu, gdzie znajduje się naładowana cząstka - na podobieństwo zmarszczek, które *s t a r t u j ą* od brzegów jeziora i zbiegają się w miejscu upadku kamienia. Jak wspominałem w rozdziale drugim, gdy odpowiednio uwzględni się oddziaływanie obu zestawów fal z wszystkimi naładowanymi cząstkami we wszechświecie, większość złożonej sieci oddziaływań zostanie wyeliminowana i zostaną tylko znajome, zdroworozsądkowe („opóźnione”) fale przenoszące oddziaływania elektromagnetyczne od jednej cząstki do drugiej. Wszystkie te oddziaływania powodują jednak, że każda naładowana cząstka - również elektrony - *n a t y c h m i a s t* rozpoznaje swoje położenie względem wszystkich innych naładowanych cząstek we wszechświecie. Namacalnym dowodem oddziaływania fal podróżujących wstecz w czasie (fal „przedwcześnie”) jest sprzężenie zwrotne, dzięki któremu każda naładowana cząstka staje się częścią całej elektromagnetycznej struktury. Jeżeli poruszymy elektron w laboratorium na Ziemi, to w zasadzie każda naładowana cząstka znajdująca się, powiedzmy, w gwiazdozbiornie Andromedy, ponad dwa miliony lat świetlnych stąd, *n a t y c h m i a s t* wie, co się stało, mimo że wytworzona wskutek poruszenia fala opóźniona będzie potrzebować ponad dwa miliony lat, aby tam dotrzeć.

Nawet zwolennicy teorii absorbera Wheelera-Feynmana rzadko ujmują to w ten sposób. Konwencjonalna wersja (jeżeli cokolwiek związanego z tą teorią może zostać określone jako

konwencjonalne) mówi, że nasz elektron znajdujący się na Ziemi „zna swoje położenie” względem wszystkich innych naładowanych cząstek, łącznie z tymi z galaktyki Andromedy. Ale przecież kluczową właściwością sprzężenia zwrotnego jest fakt, że działa ono w dwie strony. Jeżeli nasz elektron wie, gdzie leży galaktyka Andromedy, to i galaktyka z pewnością wie, gdzie znajduje się nasz elektron. Wynikiem sprzężenia zwrotnego - czyli faktu, że nie można naszego elektronu rozważać w izolacji, lecz jako część holistycznej elektromagnetycznej struktury wypełniającej wszechświat - jest opór, jaki elektron stawia, gdy się go popycha. Mimo że żaden niosący informację sygnał nie może podróżować szybciej niż światło, elektron stawia opór, ponieważ odczuwa obecność wszystkich naładowanych cząstek w odległych galaktykach.

Okazuje się, że wyjaśnienie oporu radiacyjnego, jakiego doświadczają naładowane cząstki, nieco przypomina inne zagadnienie, które od dawna stanowiło zagadkę dla fizyków. Dlaczego obiekty materialne stawiają opór, gdy się je popycha? Skąd wiedzą, jak silny opór mają stawiać? Innymi słowy, skąd się bierze bezwładność?

Pierwszym człowiekiem, który zdał sobie sprawę, że skutkiem działania na ciało sił jest nie prędkość, lecz przyspieszenie, był prawdopodobnie Galileusz. Jedną z zewnętrznych sił jest tarcie, które spowalnia każde poruszające się ciało (i które zawsze występuje na Ziemi), jeżeli się go nieustannie nie popycha. Gdyby jednak tarcie nie było, to ciało poruszałoby się wzdłuż linii prostej, dopóki nie zostałoby popchnięte lub pociągnięte przez siły.

Spostrzeżenie to stało się jednym z fundamentów, na których Newton oparł swoje prawa mechaniki. Newton mówi, że ciała poruszają się ze stałą prędkością przez pustą przestrzeń (względem pewnego układu odniesienia określającego absolutny spoczynek), chyba że są przyspieszane przez siły zewnętrzne. Dla ciała o określonej masie przyspieszenie wywołane przez określoną siłę jest równe ilorazowi tej siły i masy ciała.

Intrygujący aspekt tego odkrycia stanowi fakt, że masa, która pojawia się w powyższym wzorze na przyspieszenie, jest taka sama jak masa występująca we wzorze na siłę grawitacji. Nie jest oczywiste, że tak powinno być. Masa grawitacyjna określa siłę, którą ciało rozprzestrzenia wokół siebie we wszechświecie, aby przyciągać inne ciała; masa określana mianem bezwładnej określa siłę reakcji obiektu na popychanie lub pociąganie go przez siły zewnętrzne - niekoniecznie przez grawitację, lecz przez dowolne siły zewnętrzne. Okazuje się, że masy te są równe. Ilość materii, którą dany obiekt zawiera, określa zarówno jego wpływ na świat zewnętrzny, jak i jego reakcję na świat zewnętrzny¹²³. Jest to więc coś w rodzaju dwustronnego procesu łączącego wszystkie obiekty we wszechświecie, co bardzo przypomina działanie sprzężenia zwrotnego. Do niedawna nikt nie miał pojęcia, w jaki sposób sprzężenie to mogłoby funkcjonować.

Newton opisał interesujący eksperyment, który wydaje się, iż wskazuje, że we wszechświecie rzeczywiście istnieje wyróżniony układ odniesienia. Filozofowie orzekli później, że eksperyment ten

¹²³ Fakt, że ciało waży mniej na Księżycu niż na Ziemi, nic tu nie zmienia. Samo ciało nie ulega zmianie. To siła grawitacji na powierzchni Księżyca jest mniejsza niż na powierzchni Ziemi. Zewnętrzna siła jest mniejsza na Księżycu, inercyjna reakcja ciała jest odpowiednio dopasowana (mniejsza) i w rezultacie ciało „waży mniej”.

określa coś w rodzaju absolutnego standardu spoczynku. W 1686 roku w swoich *Principiach* Newton opisuje, co się stanie, gdy wiadro wody zawiesi się na długim sznurze, mocno zakręci w jedną stronę, a następnie pozwoli mu się obracać. Wiadro zacznie oczywiście wirować, w miarę jak sznur będzie się rozkręcać. Z początku powierzchnia wody będzie płaska, lecz w miarę jak tarcie zacznie przenosić ruch wirowy z wiadra na wodę, ona także zacznie się obracać, a powierzchnia utworzy wklęsły kształt, wskutek działania siły odśrodkowej, która wypycha wodę na zewnątrz, ku ścianom wiadra. Gdy teraz zatrzymamy wiadro, woda będzie nadal wirować, dopóki tarcie stopniowo jej nie zatrzyma. W miarę zwalniania ruchu obrotowego powierzchnia wody będzie stawać się coraz bardziej płaska, aż w końcu całkowicie się wyprostuje.

Newton stwierdził, że wklęsły kształt powierzchni wirującej wody wskazuje, iż woda „wie”, że się obraca. Ale względem czego woda się obraca? Względny ruch wody i wiadra wydaje się całkowicie nieistotny. Gdy i wiadro, i woda są nieruchome, powierzchnia wody jest płaska; gdy wiadro się obraca, ale woda nie, powierzchnia także jest płaska, mimo że mamy teraz względny ruch wody i wiadra; gdy woda wiruje, a wiadro jest nieruchome, także mamy względny ruch wody i wiadra, lecz tym razem powierzchnia wody jest wklęsła; wreszcie gdy i wiadro, i woda się obracają, nie ma względnego ruchu między nimi, a powierzchnia jest wklęsła. Newton doszedł więc do wniosku, że woda „wie”, czy obraca się względem absolutnej przestrzeni.

W osiemnastym wieku filozof, George Berkeley, zaproponował inne wyjaśnienie. Stwierdził on, że każdy ruch musi być mierzony względem czegoś namacalnego, i zwrócił uwagę, że w słynnym doświadczeniu z wiadrem istotne wydaje się to, czy woda porusza się względem najbardziej odległych obiektów, które w owym czasie określano terminem gwiazd stałych. Teraz wiemy, że gwiazdy owe są naszymi względnie bliskimi sąsiadami, a poza Drogą Mleczną istnieją miliony innych galaktyk. Mimo to argument Berkeleygo nadal pozostaje słuszny. Powierzchnia wody będzie płaska, jeżeli woda nie będzie się obracać względem odległych galaktyk, lub będzie wklęsła, gdy woda będzie wirować względem odległych galaktyk. Wydaje się, że przyspieszenie także należy mierzyć względem odległych galaktyk, inaczej mówiąc - względem średniego rozkładu całej materii we wszechświecie. Wygląda to tak, jakby obiekt, który próbujemy popchnąć, badał swoją sytuację względem całej materii we wszechświecie i odpowiednio reagował. W jakiś sposób grawitacja utrzymuje go w miejscu, i z tego powodu masa grawitacyjna i masa bezwładna są sobie równe.

Koncepcję, zgodnie z którą bezwładność wiąże się z reakcją ciała materialnego na obecność wszechświata jako całości, nazywamy zasadą Macha, od nazwiska dziewiętnastowiecznego austriackiego fizyka, Ernsta Macha, który jest wprawdzie lepiej pamiętany dzięki jednostce prędkości (równej prędkości dźwięku) nazwanej również od jego nazwiska, lecz który także zajmował się naturą bezwładności.

Jak już wspomniałem, koncepcje Macha, będące zasadniczo rozwinięciem poglądów Berkeleygo, wywarły silny wpływ na Einsteina, który uważał, że równoważność masy grawitacyjnej i bezwładnej rzeczywiście bierze się stąd, iż siły inercyjne mają pochodzenie grawitacyjne. Einstein próbował włączyć zasadę Macha - sprzężenie wszechświata z każdym ciałem obdarzonym masą -

do ogólnej teorii względności. Dosyć łatwo jest sformułować naiwny argument uzasadniający to połączenie. Grawitacyjny wpływ masy wszystkich ciał w odległych galaktykach (i we wszystkich innych miejscach) sięga do Ziemi (i do wszystkich innych miejsc) - także do pudełka dyskietek magnetycznych leżącego na moim biurku. Gdy próbuję poruszyć jedną z tych dyskietek, to wysiłek, jaki muszę w to włożyć, stanowi miarę tego, jak silnie wszechświat trzyma dyskietkę w swoim uścisku.

Znacznie trudniej jest nadać tej koncepcji solidne, naukowe ramy. Skąd dyskietka „wie”, natychmiast, do jakiego stopnia powinna stawiać opór mojej dłoni? Jedną z atrakcyjnych możliwości (w tym naiwnym obrazie) polega na tym, że dotknięcie ciała i próba zmiany jego ruchu powoduje wysłanie pewnego rodzaju falowego sygnału grawitacyjnego na wszystkie strony. Sygnał ten dociera do wszystkich zakątków wszechświata i w rezultacie w kierunku poruszonego ciała wraca coś w rodzaju echa, które ogniskuje się w miejscu położenia ciała, a skutkiem działania echa jest próba utrzymania *status quo*. Jeżeli jednak sygnały, łącznie z falami grawitacyjnymi, mogą podróżować nie szybciej niż z prędkością światła, to wygląda na to, że powrót echa i reakcja poruszonego ciała będzie trwać niemal całą wieczność.

Chyba że istnieje jakiś sposób na włączenie do opisu grawitacji koncepcji symetrii czasowej z teorii absorbera Wheelera-Feynmana, tak aby część fal grawitacyjnych związanych z tym sprzężeniem zwrotnym poruszała się wstecz w czasie. Teoria promieniowania elektromagnetycznego Wheelera-Feynmana pojawiła się około trzydziestu lat po teorii względności Einsteina i nikt nie potraktował jej poważnie nawet wtedy, więc rozwiązanie zagadki, którą stwarza zasada Macha, musiało czekać bardzo długo na poprawne sformułowanie matematyczne.

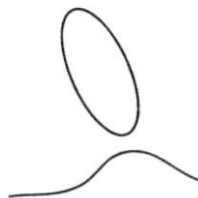
Już od momentu odkrycia teorii względności przez Einsteina trwała dyskusja, czy teoria ta właściwie uwzględnia zasadę Macha. W każdym razie stanowi ona krok w dobrym kierunku, gdyż zachowanie ciała znajdującego się w określonym położeniu zależy od krzywizny czasoprzestrzeni w tym miejscu, a krzywizna ta zależy z kolei od grawitacji pochodzącej od całej materii we wszechświecie. Nadal jednak otwarte pozostaje pytanie, jak szybko „sygnały” określające tę krzywiznę przenoszą się z miejsca na miejsce. Odległe galaktyki cały czas się poruszają, więc ich wpływ powinien się wciąż zmieniać. Czy zmiany te propagują się zaledwie z prędkością światła, czy natychmiast? A jeśli natychmiast, to w jaki sposób?

Interesującym aspektem tej debaty jest fakt, że równania Einsteina dopuszczają sprzężenia zwrotne w stylu zasady Macha tylko wtedy, gdy we wszechświecie istnieje dostateczna ilość materii, aby zakrzywić czasoprzestrzeń grawitacyjnie i „zamknąć” ją. W „otwartym” wszechświecie, rozciągającym się w nieskończoność w każdym kierunku, równań w żadnym wypadku nie da się pogodzić ze skończoną wartością bezwładności. Był to najczęściej wysuwany argument przeciwko tezie, że ogólna teoria względności obejmuje zasadę Macha, ponieważ sądzono, iż wszechświat jest otwarty. Jak się przekonaliśmy w rozdziale drugim, obecnie istnieją przekonujące dowody na potwierdzenie faktu, że wszechświat jest w istocie zamknięty. Między innymi z tego powodu poważniej traktuje się dzisiaj teorię absorbera Wheelera-Feynmana.

W 1993 roku Shu-Yuan Chu z University of California opublikował pracę¹²⁴, w której badał nierówności Bella w kontekście pewnego wariantu teorii Wheelera-Feynmana, więc napisałem do niego list i zapytałem, czym jeszcze się zajmuje. Okazało się, że bada między innymi, jak mechanika kwantowa funkcjonuje w obecności grawitacji, co w interesujący sposób łączy niektóre spośród najnowszych idei fizyki cząstek z modelem Wheelera-Feynmana i pokazuje, skąd wzięła się grawitacja, a przy okazji wyjaśnia bezwładność. W momencie pisania tej książki (marzec 1994) praca ta istniała jedynie w formie preprintu nr UCR-HEP-T117 University of California. Obejmuje ona tak wiele zagadnień i jest tak interesująco napisana, że nie można o niej nie wspomnieć, więc przynajmniej pobieżnie omówimy tę próbkę współczesnej literatury naukowej.

Strunowa grawitacja

Najpierw musimy zrobić małą dygresję, aby wyjaśnić związki tej teorii z fizyką cząstek. W latach dziewięćdziesiątych fizycy cząstek nie zadowalają się już podróżami do wnętrza materii na poziomie takich cząstek jak elektrony i kwarki. W połowie lat osiemdziesiątych nastąpiła kolejna powtórka z rozkładania cząstek „podstawowych” na części i badania, co jest w środku. Część fizyków zaintrygowało odkrycie, że właściwości elektronów i kwarków można wyjaśnić, jeżeli się założy, że są one złożone ze znacznie mniejszych obiektów zwanych strunami. Jak sama nazwa sugeruje, te „nowe” cząstki różnią się od znanych już modeli kul bilardowych tym, że są obiektami jednowymiarowymi, a raczej mają niezerową długość w jednym wymiarze, na podobieństwo małego kawałka struny.



Ryc. 25. Istnieją dwa rodzaje strun - pętle otwarte i zamknięte

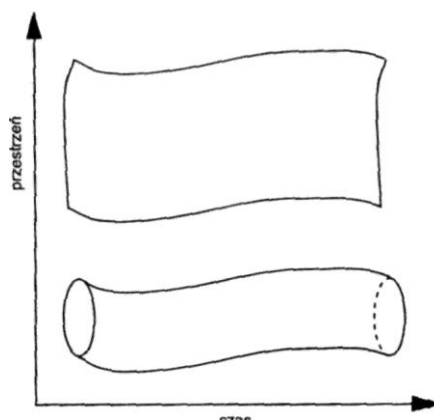
Słowo „mały” jest określeniem względnym. Typowa struna miałaby zaledwie 10^{-35} m, więc 10^{20} takich kawałków, ułożonych jeden za drugim, dałoby w sumie średnicę protonu. Nie ma doświadczalnych dowodów na istnienie tak małych obiektów. Eksperymentalne badania oddziaływań zachodzących w takiej skali wymagałyby więcej energii, niż potrafiłby dostarczyć jakikolwiek wyobrażalny akcelerator zbudowany na Ziemi. Możliwość istnienia strun poparta jest jednak przez dobrze ugruntowaną teorię oddziaływań funkcjonujących w świecie cząstek, skonstruowaną w pewnej mierze na podstawie klasycznego podejścia do teorii wszystkiego, opracowanego w ramach QED i QCD. Poprzednio starałem się wykazać, że żadna z naszych teorii i modeli nie stanowi całej prawdy o świecie cząstek i że wszystkie one są mniej lub bardziej udanymi próbami stworzenia obrazu, który moglibyśmy zrozumieć i na jego podstawie formułować przewidywania. W tym sensie teoria strun jest bardzo skuteczna. Mimo że nikt nie widział struny

¹²⁴ „Physical Review Letters”, 71 (1993), s. 2847.

ani też nie wykryto ich w eksperymentach z akceleratorami, właściwości takie jak ładunek mogą być wyjaśnione jako „przywiązane” do końców strun, a oddziaływania cząstek można tłumaczyć w kategoriach zderzeń, podziałów i połączeń strun. Okazuje się, że zamknięte pętle drgających strun, podobnie jak małe elastyczne gumki, mają takie właściwości, jakie teoria przewiduje dla grawitonów - cząstek przenoszących siły grawitacyjne podobnie jak fotony przenoszą siły elektromagnetyczne. Cała koncepcja jest spójna, logiczna i (dla osób z dostatecznym przygotowaniem matematycznym) nie gorsza od innych pomysłów wyjaśniających funkcjonowanie świata. Jedyne jej mankamentem jest fakt, że jak dotąd nie ma sposobu na przeprowadzenie definitywnego testu doświadczalnego w takim sensie, w jakim rozumiał to Newton. Nie powstrzymuje to jednak teoretyków przed próbami zastosowania teorii do wyjaśnienia znanych właściwości wszechświata - tym właśnie zajmował się Chu.

Jego badania grawitacji są po części próbą wyjaśnienia oddziaływań na poziomie strun, za pomocą symetrycznych w czasie opisów opartych na teorii Wheelera-Feynmana. Podejście to eliminuje koncepcję pól (na przykład pola elektromagnetycznego lub grawitacyjnego) jako niezależnych obiektów. Cząstki oddziałują ze sobą symetrycznie w czasie, wymieniając przedwcześnie i opóźnione „sygnały” w nieustannym procesie sprzężenia zwrotnego, a to, co uważamy za ciągłe pole, takie jak grawitacja, jest w rzeczywistości uśrednieniem wszystkich oddziaływań między małymi porcjami materii. W skali znacznie większej od rozmiarów tych porcji materii z uśrednienia wyłania się ciągłe pole grawitacyjne. Jeżeli porcje są tak małe, że potrzeba ich 10^{20} , aby dały w sumie średnicę protonu, to znaczy że nawet w skali protonu grawitacja powinna wydawać się bardzo gładka i ciągła. „Zakrzywienie czasoprzestrzeni - mówi Chu - jest odzwierciedleniem deseni w tkaninie ruchu utkanej ze strun”.

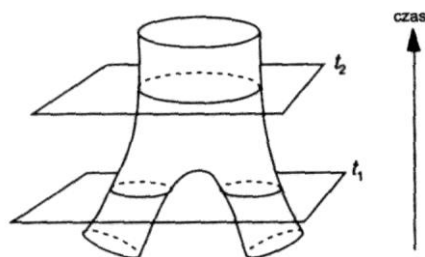
Jedną z konsekwencji tego podejścia jest fakt, że opis ruchu ciał w kategoriach klasycznych newtonowskich trajektorii wynika ze statystycznego uśredniania zachowania cząstek.



Ryc. 26. Gdy otwarte struny poruszają się przez czasoprzestrzeń, zakreślają „warstwy świata”; poruszające się zamknięte pętle zakreślają „rury świata”

„Cząstki wykonują drgania o bardzo małej amplitudzie wokół ich cząstkopodobnych trajektorii [...] po tym, jak uśrednimy drgania o dużej amplitudzie”. W opisie tym pobrzmiewa echo zarówno całkowania po trajektoriach (sumy po historiach) Feynmana, jak i statystycznego podejścia, które

Ilia Prigogine wyprowadził z termodynamiki. Nie ma tu miejsca na omówienie wszystkich szczegółów - wymagałoby to napisania kolejnej książki równie obszernej jak ta - lecz zarówno Prigogine, jak i Chu skonstruowali opisy rzeczywistości, w których najważniejsza jest statystyka,



Ryc. 27. Dwie pętle zamkniętych strun poruszające się w czasoprzestrzeni i łączące się ze sobą tworzą parę czasoprzestrzennych spodni

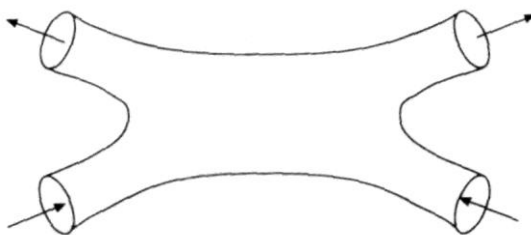
a dopiero z niej wynikają klasyczne trajektorie cząstek. Zdaniem Chu, zarówno w klasycznym, jak i w kwantowym świecie „statystyka wydaje się podstawą mechaniki [...] powinniśmy wywodzić mechanikę ze statystyki, a nie na odwrót”.

Związek ze statystyką jest oczywisty. Kluczowym pojęciem statystyki jest entropia - właściwość, która stanowi miarę odstępstwa układu od położenia równowagi. Podejście Chu pokazuje, że równanie ruchu Einsteina stanowi poprawny opis trajektorii cząstek w warunkach równowagi określonej przez maksimum entropii. Podobnie jak w oryginalnej teorii Wheelera-Feynmana (i w próbach włączenia zasady Macha do ogólnej teorii względności), musi nastąpić całkowita absorpcja dzisiejszego promieniowania strun przez struny w przyszłości - innymi słowy, wszechświat musi być zamknięty. W liście, który otrzymałem od Chu pod koniec 1993 roku, następująco podsumował on swoje wnioski: „Klasyczna mechanika opisuje warunek równowagi (i stąd brak w niej wszelkich kategorii probabilistycznych); mechanika kwantowa opisuje fluktuacje; formalizm całkowania po trajektoriach wynika z sumowania po olbrzymiej liczbie strun w układzie”.

Dla kogoś, kto śledził toczącą się w ostatnich latach kosmologiczną debatę, podejście Chu jest szczególną gratką. Opis wszechświata według Einsteina, czyli równania ogólnej teorii względności, zawiera pewną liczbę, zwaną stałą kosmologiczną, która przez ponad siedemdziesiąt lat wprawiała astronomów w zakłopotanie. Liczby tej nie da się wyprowadzić z równań Einsteina i wydaje się, że może mieć ona dowolną wartość. Obserwacje rozszerzania się wszechświata sugerują jednak, że musi być ona bardzo bliska zera. Nawet niewielka wartość stałej kosmologicznej miałaby poważny wpływ na obserwowane tempo rozszerzania się wszechświata. Opis grawitacji zaproponowany przez Chu staje się identyczny z opisem Einsteina przy odległościach znacznie większych od długości struny, lecz dla stałej kosmologicznej równej dokładnie zera.

Wracając do nierówności Bella, możemy stwierdzić, iż problem polega na tym, że eksperymenty wskazują natychmiastowe korelacje między oddalonymi cząstkami. W publikacji w „Physical Review Letters” Chu zwraca jednak uwagę na to, że: „Natychmiastowa korelacja między dwiema przestrzennie rozdzielonymi cząstkami może być zrealizowana za pośrednictwem trzeciej cząstki,

która koreluje z jedną z dwu cząstek przez przedwczesne oddziaływanie, a z drugą przez opóźnione".



Ryc. 28. W kontekście teorii strun oddziaływanie między dwiema cząstkami jest reinterpretowane w kategoriach łączących się i rozdzielających „rur świata”. Powyższy diagram można skomplikować, dodając więcej pętli, podobnie jak komplikuje się obliczanie momentu magnetycznego elektronu (por. ryc. 13)

Stąd wzięły się próby włączenia podejścia Wheelera-Feynmana do opisu mechaniki kwantowej, a potem do opisu grawitacji za pomocą teorii strun. W owym czasie Chu nie zdawał sobie sprawy, że filozoficzne podstawy tego podejścia zostały sformułowane przez Johna Cramera z University of Washington w serii prac opublikowanych w latach osiemdziesiątych. Interpretacja transakcyjna mechaniki kwantowej opiera się na metodzie identycznej z użytą przez Chu. Fakt, że Chu udało się skutecznie zastosować te idee do teorii strun i grawitacji, sugeruje, że w najbliższej przyszłości będzie to obszar ożywionej działalności fizyków. Gdy wspomniałem mu o pracy Cramera, Chu odpowiedział: „Gdybym wiedział wcześniej, że przedwczesne oddziaływania były brane pod uwagę w tych dyskusjach, to z pewnością z mniejszymi obawami pracowałbym nad uogólnieniem elektrodynamiki Wheelera-Feynmana na teorię strun”.

Odrzućmy zatem wszelkie obawy! Oto interpretacja, która stanowi najlepszy obraz funkcjonowania świata na poziomie kwantowym, dla każdego, kto chce mieć jedną „odповідź” na wszystkie zagadki - nierówność Bella, eksperyment Aspecta i los kotków Schrödingera.

Proste oblicze złożoności

Teoria Wheelera-Feynmana w swojej oryginalnej wersji była, ściśle rzecz biorąc, teorią klasyczną, ponieważ nie uwzględniała procesów kwantowych. W latach sześćdziesiątych fizycy odkryli, że w rzeczywistości istnieją tylko dwie możliwości ustabilizowania się złożonego układu nakładających się i oddziałujących fal, z których część porusza się wstecz, a część w przód w czasie. Układ taki musi zostać zdominowany albo przez promieniowanie opóźnione (tak jak w naszym wszechświecie), albo przez przedwczesne (w takim wszechświecie czas biegłby wstecz). Na początku lat siedemdziesiątych powstało kilka kwantowych wersji teorii Wheelera-Feynmana stworzonych przez kosmologów, których zainspirowało zagadnienie, czy we wszechświecie musi w ogóle istnieć wyróżniony kierunek czasu. W sensie formalnym były one równoważne teorii QED w ujęciu Wheelera-Feynmana. Fred Hoyle i Jayant Narlikar wykorzystali technikę całkowania po trajektoriach, a Paul Davies zastosował podejście zwane teorią macierzy S . Szczegóły matematyczne nie są tu istotne, ważne jest to, że w każdym wypadku okazało się, iż teorię absorbera Wheelera-Feynmana można przekształcić w model całkowicie kwantowy.

Powodem zainteresowania kosmologów była sugestia - która nadal pozostaje jedynie sugestią - że dominacja fal opóźnionych w naszym wszechświecie i istnienie określonego kierunku upływu czasu wiąże się z faktem, iż sam wszechświat wykazuje asymetrię czasową, z wielkim wybuchem w przeszłości i (być może) ostatecznym kolapsem w wielkim zgnieceniu¹²⁵ w przyszłości. Teoria Wheelera-Feynmana pozwala istniejącym tu i teraz cząstkom „wiedzieć” o przeszłych i przyszłych stanach wszechświata - te „warunki brzegowe” być może powodują selekcję i dominację fal opóźnionych.

Wszystko to ograniczało się wyłącznie do promieniowania elektromagnetycznego. Kolejny krok wykonał John Cramer, który rozszerzył te koncepcje na równania falowe mechaniki kwantowej - na równanie Schrödingera i równania opisujące fale prawdopodobieństwa, które poruszają się z prędkością światła, podobnie jak fotony. Wyniki Cramera ukazały się w obszernym artykule przeglądowym opublikowanym w 1986 roku¹²⁶, ale znalazły tak znikomy oddźwięk, że na przykład Chu nigdy nie słyszał o interpretacji Cramera, gdy w 1993 roku rozwijał swoje koncepcje oparte na teorii strun.

Aby wykorzystać teorię absorbera w mechanice kwantowej, potrzebne jest równanie, takie jak równania Maxwella, które daje dwa rozwiązania - jedno z nich równoważne fali o dodatniej energii poruszającej się w przód w czasie, a drugie opisujące falę o ujemnej energii biegnącą w przeszłość. Na pierwszy rzut oka słynne równanie falowe Schrodingera nie spełnia tego warunku, ponieważ opisuje ono ruch w jednym kierunku, który (oczywiście) interpretujemy jako ruch od przeszłości do przyszłości. Wszyscy fizycy uczą się jednak na studiach (i w większości zaraz o tym zapominają), że najczęściej stosowana wersja tego równania jest niekompletna. Już sami pionierzy teorii kwantowej zdali sobie sprawę, że wersja ta nie uwzględnia wymogów teorii względności. W większości wypadków nie ma to znaczenia, toteż studenci fizyki oraz większość mechaników kwantowych stosuje tę uproszczoną wersję. Pełna wersja równania falowego, uwzględniająca we właściwy sposób efekty relatywistyczne, jest znacznie bardziej podobna do równań Maxwella. W szczególności ma ona dwa zestawy rozwiązań. Jeden z nich odpowiada powszechnie znanemu równaniu Schrodingera, a drugi swoistemu lustrzanemu odbiciu tego równania opisującemu przepływ ujemnej energii w kierunku przeszłości.

Dwoistość ta najlepiej uwidacznia się w obliczeniach prawdopodobieństw w mechanice kwantowej. Właściwości układu kwantowego są opisane przez wyrażenie matematyczne, zwane wektorem stanu (w gruncie rzeczy jest to inna nazwa funkcji falowej), które zawiera informację o obiekcie kwantowym (którym może być na przykład pakiet falowy elektronu) - o jego położeniu, pędzie, energii i innych właściwościach. Wektor stanu może przybierać jako wartości zarówno zwykłe (rzeczywiste) liczby, jak i liczby urojone (czyli te, które zawierają i , pierwiastek kwadratowy

¹²⁵ Zwanym także niekiedy „wielkim zapadnięciem” lub „wielkim zgniotem”. W terminologii angielskiej stosuje się określenie „Big Crunch”, co dosłownie znaczy „wielkie chrupnięcie” (przyp. tłum.).

¹²⁶ *The transactional interpretation of quantum mechanics* [Transakcyjna interpretacja mechaniki kwantowej], „Reviews of Modern Physics”, 58 (1986), s. 647.

z liczby - 1). W ogólności może to być liczba, która zawiera zarówno jeden, jak i drugi rodzaj liczb. Taka mieszanina zwana jest liczbą zespoloną, z oczywistych powodów zapisuje się ją jako sumę (lub różnicę) części rzeczywistej i części urojonej. Określenie prawdopodobieństwa, że na przykład znajdziemy elektron w określonym miejscu w określonym czasie, polega na obliczeniu kwadratu wektora stanu odpowiadającego danemu stanowi elektronu. Obliczenie kwadratu liczby zespolonej nie polega jednak na pomnożeniu jej przez samą siebie. W tym celu trzeba wyliczyć inną liczbę, lustrzane odbicie tej pierwszej, zwane sprzężeniem zespolonym, które powstaje przez zamianę znaku stojącego przed częścią urojoną: jeżeli był tam znak plus, to należy wstawić minus, i *vice versa*. Aby otrzymać wartość prawdopodobieństwa, należy pomnożyć przez siebie te dwie liczby zespolone. W równaniach, które opisują ewolucję układu w czasie, ten proces zamiany znaku części urojonej i związane z nim obliczenie sprzężenia zespolonego jest równoważne z odwróceniem kierunku upływu czasu! Podstawowe równanie na prawdopodobieństwo, sformułowane w 1926 roku przez Maxa Borna, zawiera jawne odwołanie do natury czasu i do możliwości istnienia dwóch rodzajów równania Schrödingera, z których jedno opisuje fale przedwcześnie, a drugie - opóźnione. W tym momencie dla nikogo nie powinno być niespodzianką, że dwa zestawy rozwiązań relatywistycznej wersji kwantowo-mechanicznego równania falowego są w istocie sprzężeniami zespolonymi. Zgodnie z tradycją przez siedemdziesiąt lat większość fizyków ignorowała jeden z tych dwóch zestawów, ponieważ mówienie o falach podróżujących wstecz w czasie nie miało „oczywiście” sensu!

Godną uwagi konsekwencją tej sytuacji jest fakt, że od 1926 roku, za każdym razem, gdy fizycy obliczali zespolone sprzężenie równania Schrödingera, aby uzyskać kwantowe prawdopodobieństwa, w rzeczywistości, nie wiedząc o tym, uwzględniali oni wpływ fal podróżujących wstecz w czasie. W stworzonej przez Cramera interpretacji mechaniki kwantowej nie ma żadnego problemu z matematyką, gdyż matematyka, aż do poziomu samego równania Schrödingera, jest **d o k ł a d n i e t a k a s a m a** jak w standardowej interpretacji kopenhaskiej. Różnica tkwi, dosłownie, w interpretacji. Jak napisał w swojej publikacji (s. 660) Cramer, „pole staje się w efekcie matematycznym środkiem do opisu procesów działania na odległość”. Dokładnie do tych samych wniosków doszedł siedem lat później Chu, niezależnie od Cramera. Przekonawszy się (mam nadzieję), że podejście to jest sensowne, zobaczmy teraz, w jaki sposób wyjaśnia ono niektóre spośród zagadek i paradoksów kwantowego świata.

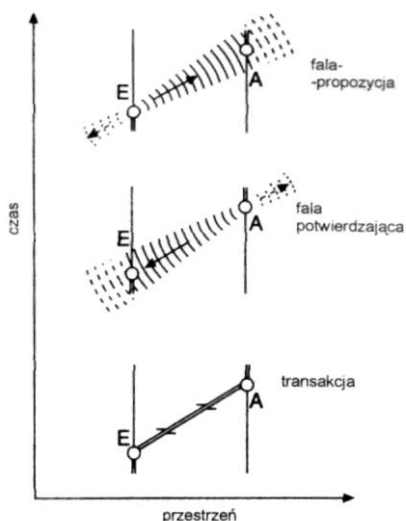
Uścisk dłoni z wszechświatem

Cramer opisuje typową kwantową „transakcję” w kategoriach „podania dłoni” jednej cząstce przez inną, znajdującą się w innym miejscu i w innym czasie. Możemy sobie to wyobrażać jako proces, w którym elektron emituje promieniowanie elektromagnetyczne, absorbowane następnie przez inny elektron, lecz opis równie dobrze działa w przypadku wektora stanu dowolnego obiektu kwantowego, który w wyniku oddziaływania przeskakuje od jednego stanu do innego - na przykład wektora stanu cząstki emitowanej przez źródło po jednej stronie eksperymentu z dwiema szczelinami, a następnie absorbowanej przez detektor po drugiej stronie. Jedną z trudności

związanych z opisem tego rodzaju procesów w zwykłym języku jest problem oddziaływań, które odbywają się równocześnie w obie strony w czasie, czyli z punktu widzenia zwykłych zegarów zachodzą natychmiastowo. Cramer pokonuje tę trudność w ten sposób, że efektywnie umiejscawia się poza czasem i stosuje semantyczny mechanizm opisu w kategoriach pewnego rodzaju pseudoczasu. Jest to oczywiście jedynie zabieg semantyczny, nic więcej, lecz z pewnością ułatwia czytelnikowi zrozumienie, o co chodzi.

Gdy elektron drga, wytwarza pole, które jest symetryczną w czasie mieszaniną fali opóźnionej biegnącej w przyszłość i fali przedwczesnej biegnącej w przeszłość. Aby ułatwić sobie analizę, zajmiemy się nimi po kolei - najpierw zobaczmy, co się dzieje z falą opóźnioną. Porusza się ona w przód w czasie, aż napotka elektron, który może pochłonąć energię niesioną przez pole. Proces absorpcji pobudza elektron do drgań, które powodują wyemitowanie nowej fali opóźnionej. Fala ta kasuje się z pierwotną falą opóźnioną, w wyniku czego przyszłość cząstki absorbującej w ogóle nie zawiera pola opóźnionego.

Absorber produkuje jednak również falę przedwczesną o ujemnej energii, poruszającą się wstecz w czasie w kierunku emitera, wzdłuż kierunku ruchu pierwotnej fali opóźnionej. Ta przedwczesna fala zostaje pochłonięta przez emiter, który na skutek tej absorpcji emituje drugą falę przedwczesną w przeszłość.



Ryc. 29. Na tym diagramie przedstawiona jest interpretacja transakcyjna mechaniki kwantowej. Idąc od góry do dołu, emiter E wysyła falę--propozycję w przeszłość i w przyszłość (rycina górna); falę tę przechwytuje absorber A, który wysyła echo - falę potwierdzającą wstecz w czasie w kierunku emitera o r a z w przyszłość (rycina środkowa); fala-propozycja i fala potwierdzająca kasują się wszędzie we wszechświecie z wyjątkiem drogi łączącej absorber i emiter, gdzie wzajemnie się wzmacniają, dając kwantową transakcję (rycina dolna). Ten diagram wystarcza, aby zrozumieć wszystkie kwantowe tajemnice. Oto mit na miarę naszych czasów

Nowa fala przedwczesna kasuje dokładnie pierwotną falę przedwczesną, w wyniku czego nic nie jest emitowane w przeszłość przed momentem wysłania pierwszej fali promieniowania. Tym, co zostaje, jest podwójna fala łącząca emiter i absorber niosąca dodatnią energię w przyszłość i ujemną energię w przeszłość (w kierunku ujemnego czasu). Dwa minusy dają plus, więc

przedwczesna część tej podwójnej fali dodaje się do fali opóźnionej, tak jakby również była falą opóźnioną, poruszającą się od emitera do absorbera¹²⁷.

Jak mówi Cramer: „Można to zinterpretować w ten sposób, że emiter produkuje falę «propozycję», która biegnie w kierunku absorbera. Absorber odpowiada, wysyłając w kierunku emitera falę «potwierdzającą». Całą transakcję wieńczy «uścisk dłoni» przez czasoprzestrzeń”¹²⁸. Powyższa sekwencja zdarzeń odbywa się w pseudoczasie. W rzeczywistości cały ten proces jest bezczasowy; zachodzi natychmiast w całości, gdyż sygnały podróżujące z prędkością światła nie potrzebują czasu, aby dotrzeć na miejsce - z ich perspektywy każdy punkt wszechświata znajduje się w pobliżu każdego innego punktu wszechświata. Nie ma także znaczenia, czy sygnały podróżują w przód czy wstecz w czasie, ponieważ podróż zabiera im zero czasu (w ich własnym układzie odniesienia), a +0 to to samo co -0.

W trzech wymiarach sytuacja nieco się komplikuje, lecz konkluzje są dokładnie takie same. Zakładając najbardziej ekstremalny przypadek, we wszechświecie zawierającym tylko jeden elektron nie istniałoby promieniowanie (elektron nie mógłby promieniować ani też nie miałby masy, jeżeli zasada Macha jest słuszna). Gdyby znajdowały się w nim dwa elektrony, to mogłyby promieniować tylko nawzajem do siebie. W rzeczywistym wszechświecie, gdyby w skali całego wszechświata materia nie była rozmieszczona jednorodnie i w pewnych kierunkach możliwość absorpcji byłaby inna niż w pozostałych, to stwierdzilibyśmy, że nadajniki (takie jak anteny radiowe) „odmawiałyby” promieniowania jednakowo silnie we wszystkich kierunkach. W istocie przeprowadzono próby wykrycia tej możliwości, przez wysyłanie mikrofal w różne kierunki wszechświata, lecz nie wykazały one żadnych oznak niechęci elektronów do promieniowania w jakimkolwiek kierunku.

Cramer wyraźnie podkreśla, że jego interpretacja nie daje żadnych przewidywań, które byłyby odmienne od konwencjonalnej mechaniki kwantowej, lecz stanowi model pojęciowy, który powinien ułatwić ludziom zrozumienie tego, co się dzieje w świecie kwantów - narzędzie, które może okazać się szczególnie przydatne w nauczaniu oraz w rozwijaniu intuicji i wyobrażeń na temat tajemnic zjawisk kwantowych. Nie należy oczywiście rozumieć tego w ten sposób, że interpretacja transakcyjna jest w jakimś sensie uboższa od innych interpretacji teorii kwantowej - wszystkie są tylko modelami, stworzonymi po to, aby wesprzeć nasze zrozumienie zjawisk kwantowych i wszystkie dają te same przewidywania. J e d y n y m kryterium wyboru konkretnej interpretacji jest to, do jakiego stopnia ułatwia nam ona odkrywanie i rozumienie tajemnic świata kwantów - pod tym względem interpretacja Cramera jest bezkonkurencyjna.

Po pierwsze, dość wiarygodnie tłumaczy ona przyczyny istnienia strzałki czasu, a także przyznaje równe prawa wszystkim procesom fizycznym. Obserwator (inteligentny lub nie) i jego

¹²⁷ Powyższe rozumowanie równie dobrze można przeprowadzić, zaczynając od emisji promieniowania w przeszłość przez absorber; sama interpretacja transakcyjna nie wyróżnia żadnego kierunku czasu, lecz sugeruje, że jest on związany z warunkami brzegowymi wszechświata, które faworyzują kierunek czasu zwrócony od wielkiego wybuchu.

¹²⁸ J. Cramer, *Transactional interpretation*, s. 661.

układ pomiarowy nie muszą już mieć specjalnego statusu, co kładzie kres filozoficznej debacie o roli obserwatora w mechanice kwantowej, która trwała przez ponad pół wieku. Co więcej, interpretacja transakcyjna rzeczywiście rozwiązuje te klasyczne tajemnice świata kwantów. Rozważmy dwa przykłady - w jaki sposób Cramer radzi sobie z eksperymentem z dwiema szczelinami i jak jego interpretacja tłumaczy doświadczenie Aspecta.

Jeżeli zamierzamy wyjaśnić główną zagadkę eksperymentu z dwiema szczelinami, to równie dobrze możemy próbować zrozumieć ostateczną wersję tego doświadczenia - opisany w rozdziale trzecim wariant zaproponowany przez Johna Wheelera i nazwany „eksperymentem z opóźnionym wyborem”. Pamiętamy, że w jednej z wersji tego eksperymentu źródło światła emituje serię fotonów, które przebiegają przez układ dwóch szczelin. Po drugiej stronie znajduje się ekran, który może zarejestrować położenia nadlatujących fotonów lub może zostać usunięty w trakcie lotu fotonów, aby pozwolić im pobiec dalej, w kierunku pary teleskopów, z których każdy jest wycelowany w jedną z dwóch szczelin. Jeżeli ekran jest usunięty, to teleskopy zarejestrują pojedyncze fotony przebiegające przez jedną z dwóch szczelin, bez żadnych śladów interferencji. Jeżeli ekran jest ustawiony, to powstanie na nim obraz interferencyjny, tak jakby fotony przechodziły przez obie szczeliny równocześnie. Ponieważ ekran może zostać usunięty po przejściu fotonów przez szczeliny, ich decyzja, jak się zachować, wydaje się zdeterminowana przez zdarzenie, które zachodzi po podjęciu tej decyzji.

W wersji wydarzeń proponowanej przez Cramera opóźniona „fala-propozycja” (dla potrzeb niniejszej dyskusji monitorowana w pseudo-czasie) biegnie przez obie szczeliny eksperymentu. Jeżeli ekran jest podniesiony, to fala zostanie zaabsorbowana przez detektor, wyzwalając przedwczesną „falę potwierdzającą”, która podąży z powrotem przez obie szczeliny układu w kierunku źródła. Ostateczna transakcja powstaje wzdłuż obu możliwych ścieżek (w istocie, jak podkreśla Feynman, wzdłuż każdej możliwej ścieżki) i pojawia się interferencja.

Jeżeli ekran jest opuszczony, to fala-propozycja przechodzi przez układ w kierunku teleskopów wycelowanych w szczeliny. Każdy teleskop jest wycelowany w kierunku jednej z dwóch szczelin, więc gdy fala-propozycja oddziałuje z teleskopem, wytworzona w rezultacie fala potwierdzająca wraca w kierunku źródła przez tę właśnie szczelinę. W akcie absorpcji musi oczywiście uczestniczyć cały foton, a nie tylko jego część, więc źródło musi „wybrać” (losowo), który spośród fotonów wysyłanych przez teleskopy zaakceptuje jako potwierdzenie swojej pierwotnej oferty. W rezultacie tworzy się ostateczna transakcja, w której uczestniczy pojedynczy foton biegnący przez jedną ze szczelin. Ewoluuje wektor stanu fotonu „wie”, czy ekran będzie podniesiony czy opuszczony, ponieważ fala potwierdzająca rzeczywiście podróżuje wstecz w czasie przez układ, lecz cała transakcja jest aczasowa, podobnie jak w poprzednio opisanej sytuacji.

Moment, w którym obserwator podejmuje decyzję, który eksperyment wykonać, nie ma w tej sytuacji znaczenia. Obserwator ustalił konfigurację układu doświadczalnego oraz warunki brzegowe i na tej podstawie powstała transakcja. Co więcej, nie ma w tym wypadku znaczenia fakt, że zdarzenie, w którym zachodzi detekcja fotonu, jest związane z pomiarem (w odróżnieniu od

jakiegokolwiek innego oddziaływania), a sam obserwator nie odgrywa żadnej wyróżnionej roli w całym procesie¹²⁹.

Możemy zabawiać się wyjaśnianiem w podobny sposób losów kota Schrödingera (i przyjaciela Wignera). Ponownie okaże się, że kompletna transakcja pozwala na zrealizowanie tylko jednej możliwości (martwy kot lub żywy kot), a ponieważ „kolaps funkcji falowej” nie musi czekać, aż obserwator zajrzy do środka, nie ma takiego momentu, w którym kot jest na pół żywy i na pół martwy. Interpretacja transakcyjna jest tak prosta i przekonująca, że czytelnik z pewnością potrafi sam prześledzić szczegóły tego procesu.

A co z nierównościami Bella, paradoksem Einsteina-Podolsky'ego-Rosena oraz doświadczeniem Aspecta? W końcu to dzięki nim w latach osiemdziesiątych ponownie wzrosło zainteresowanie podstawami mechaniki kwantowej. Z punktu widzenia teorii absorbera nietrudno sobie wyobrazić, co się dzieje. Niech atom w stanie wzbudzonym tuż przed wyemitowaniem dwóch fotonów wysyła na wszystkie strony fale-propozycje, w rozmaitych stanach polaryzacji (nadal rozważamy ten proces w pseudoczasie). Transakcja zostanie dokonana i fotony wyemitowane tylko wtedy, gdy potwierdzające fale opóźnione zostaną wysłane wstecz w czasie od odpowiedniej pary obserwatorów w kierunku atomu. Gdy warunek ten zostanie spełniony, fotony zostaną wysłane i zaobserwowane, wywołując dwa zdarzenia detekcji, w których polaryzacje fotonów są skorelowane mimo oddalenia w przestrzeni. Jeżeli fale potwierdzające nie pasują do stanu polaryzacji fotonów, to nie mogą one „weryfikować” tej samej transakcji i nie będą w stanie wykonać „uścisku dłoni”. Z perspektywy pseudoczasu para fotonów nie może zostać wyemitowana, dopóki nie zostanie zorganizowana ich absorpcja, a proces ten określa polaryzacje emitowanych fotonów, mimo że emisja zachodzi przed absorpcją. Niemożliwe jest, aby atom mógł wyemitować fotony w stanie, który nie odpowiada polaryzacji dopuszczalnej przez detektory. W gruncie rzeczy w modelu absorbera atom nie może w ogóle wyemitować fotonów, jeżeli uprzednio nie zostało osiągnięte porozumienie co do ich absorpcji.

Podobnie rozstrzyga się los dwóch kotków podróżujących w swoich kapsułach do dwóch końców Galaktyki. Obserwacja, która określa, w której połowie pudełka znajduje się elektron, a zatem, który kotek przeżyje, a który zginie, wraca wstecz w czasie do początku eksperymentu, w natychmiastowy (a raczej aczasowy) sposób określając stany kotków podczas całej ich podróży, w czasie której pozostawały one zamknięte i odizolowane w swoich kapsułach.

Jeżeli którekolwiek ogniwo łańcucha zdarzeń jest wyróżnione, to nie jest to bynajmniej ostatnie z nich, lecz to, w którym emiter, otrzymawszy rozmaite fale potwierdzające w odpowiedzi na swoją falę-propozycję, wzmacnia jedną z nich w taki sposób, że staje się ona realną i dokonaną transakcją. W czasie transakcji nie ma żadnego „kiedy” na końcu¹³⁰.

¹²⁹ J. Cramer, *Transactional interpretation*, s. 673.

¹³⁰ J. Cramer, *Transactional interpretation*, s. 674.

Ten niezwykle sukces w rozwiązywaniu zagadek fizyki kwantowej wymagał akceptacji tylko jednej idei - że część kwantowych fal może poruszać się wstecz w czasie. Na pierwszy rzut oka koncepcja ta robi wrażenie sprzecznej ze zdroworozsądkową intuicją, zgodnie z którą przyczyny muszą zawsze poprzedzać skutki. Po dokładniejszej analizie okazuje się jednak, że ten rodzaj podróży w czasie, który przewiduje interpretacja transakcyjna, nie narusza naszego pojęcia przyczynowości, i że „uściski dłoni” we wszechświecie niekoniecznie oznaczają przekreślenie naszego najbardziej cenionego atrybutu - wolnej woli.

Czas na czas

W codziennym świecie przyczyny zawsze poprzedzają skutki. W mojej głowie powstaje kolejne zdanie, następnie wstukuję je w komputer, a niewielki ułamek sekundy po uderzeniu w każdy klawisz odpowiednia litera pojawia się na ekranie. Nie jest niestety tak, że słowa najpierw pojawiają się na ekranie, a ja następnie czytam je, aby się przekonać, co mam do powiedzenia. Gdy aczasowy uścisk dłoni odbywa się za pomocą przedwcześniejszej fali kwantowej, poruszającej się wstecz w czasie, nie ma to żadnego wpływu na logiczny ciąg przyczynowo-skutkowy w świecie codziennym.

Cramer twierdzi, że istnieją dwa rodzaje przyczynowości, „silna” i „słaba”. Zasada słabej przyczynowości funkcjonuje w codziennym świecie (makroskopowym) i jest podstawą naszych zdroworozsądkowych pojęć związanych z czasem. Mówi ona, że makroskopowa przyczyna musi zawsze poprzedzać makroskopowe skutki w każdym układzie odniesienia. Makroskopowa informacja nigdy nie może być transmitowana szybciej niż światło lub wstecz w czasie. Koncepcja ta jest zapewne nie do przyjęcia dla większości ludzi, lecz Cramer definiuje także silną zasadę przyczynowości, która mówi, że przyczyna musi zawsze poprzedzać **w s z y s t k i e** skutki w każdym układzie odniesienia. Nawet w skali mikroskopowej (czyli w świecie kwantów) informacja nie może być przesyłana wstecz w czasie lub szybciej niż światło. Sądzi się zazwyczaj, że silna zasada w sposób oczywisty wynika ze słabej, lecz Cramer zwraca uwagę na brak eksperymentalnych dowodów na rzecz prawdziwości silnej zasady. W gruncie rzeczy dowody doświadczenia - testy nierówności Bella - dowodzą, że mikroskopowa przyczynowość jest naruszana niezależnie od tego, którą interpretację mechaniki kwantowej uznajemy. W teorii absorbera silna przyczynowość jest zawsze naruszana, lecz słaba zasada pozostaje zachowana, dopóki proces absorpcji zawsze zachodzi w przyszłości.

Dla nikogo nie powinno być niespodzianką, że sposób, w jaki interpretacja transakcyjna obchodzi się z czasem, nie ma wiele wspólnego ze zdrowym rozsądkiem, gdyż uwzględnia ona efekty relatywistyczne, a widzieliśmy już, jak daleko odbiegają one od zdroworozsądkowych poglądów na temat czasu. Dla kontrastu, interpretacja kopenhaska traktuje czas w klasyczny, newtonowski sposób, co stanowi źródło wszystkich trudności pojawiających się przy próbach wyjaśnienia wyników procesów, które zachodzą na przykład w eksperymencie Aspecta. Gdyby prędkość światła była nieskończona, to nie byłoby problemu; nie istniałaby różnica między

lokalnym i nielokalnym opisem tych procesów, a zwykle równanie Schrödingera stanowiłoby poprawny opis tego, co się dzieje - równanie Schrödingera jest w istocie poprawnym relatywistycznym równaniem w przypadku nieskończonej prędkości światła. Cramer odkrył dosyć subtelny związek między teorią względności i mechaniką kwantową, który stał się fundamentem jego interpretacji.

W jaki sposób aczasowy uścisk dłoni wpływa na możliwość istnienia wolnej woli? Na pierwszy rzut oka wydaje się, że jeżeli zachodzi komunikacja między przyszłością a przeszłością, to wszystko jest ustalone. Każdy wyemitowany foton z góry „wie”, kiedy i gdzie zostanie zaabsorbowany. Każda kwantowa fala prawdopodobieństwa prześlizgująca się z prędkością światła przez szczeliny eksperymentu interferencyjnego z góry „wie”, jaki detektor czeka na nią po drugiej stronie. Wracamy do obrazu zamrożonego wszechświata oglądanego z perspektywy fotonu, wszechświata, w którym ani czas, ani przestrzeń nie mają żadnego znaczenia, a wszystko, co kiedykolwiek było lub będzie, po prostu *j e s t*.

Jest to jednak tylko perspektywa fotonu lub innego obiektu (na przykład kwantowej fali prawdopodobieństwa), który podobnie jak foton porusza się z prędkością światła. Dla obiektów makroskopowych, takich jak istoty ludzkie, czas jest dostatecznie realny. W moim układzie odniesienia mam jeszcze czas na decyzję, jak będzie wyglądać następne zdanie lub czy wolę zrobić sobie przerwę na obiad teraz czy za dwadzieścia minut. Być może podejmowane przeze mnie decyzje wytwarzają spletaną sieć aczasowych połączeń kwantowych, dzięki którym foton, gdyby umiał mówić, potrafiłby powiedzieć mi, w jaki sposób decyzje te wpłyną na moją przyszłość. Zasada słabej przyczynowości chroni mnie jednak przed przeciekami tego rodzaju informacji ze świata mikroskopowego do makroskopowego. W strukturach czasowych, w których żyję, decyzje te podejmowane są z całkowicie wolną wolą i bez żadnej pewności co do ich skutków w przyszłości. W makroskopowym świecie potrzeba czasu na podjęcie decyzji (zarówno ludzkich, jak i kwantowych wyborów, takich jak na przykład rozpad atomu), które stwarzają aczasową realność mikroskopowego świata. To, czego doświadczamy, jest bardziej podobne do pseudoczasu Cramera niż do aczasowych uścisków dłoni, które leżą u podstaw oddziaływań kwantowych.

W każdym razie ja tak to widzę. Jak wszystko w tej dziedzinie, jest to tylko analogia, mit lub model. Czytelnik może odkryć inny sposób myślenia o sprzężeniu naszego codziennego poczucia czasu z aczasowym światem kwantów. Może nawet będzie wolał uznać, idąc śladem przekornej sugestii Johna Bella, że nie istnieje coś takiego jak wolna wola i że sukces interpretacji transakcyjnej stanowi dowód na to, iż wszystko ma swoje z góry zadane przeznaczenie (przynajmniej z naszej ludzkiej perspektywy) - że nie miałem innego wyjścia, niż napisać tę książkę, a czytelnik nie miał innej możliwości, jak tylko przeczytać ją. Mimo że nielokalność wszechświata na poziomie mikroskopowym może nam się wydawać nie do zaakceptowania i może utrudniać zrozumienie związków między przeszłością, teraźniejszością i przyszłością, musimy pamiętać, że nie jest to jedynie właściwość tej konkretnej interpretacji, lecz fakt doświadczalny, który musi zostać uwzględniony przez każdą zadowalającą interpretację

kwantowej rzeczywistości. Co więcej, wydaje się, że to aczasowe sprzężenie różnych obszarów czasoprzestrzeni w jedną spójną całość dosyć dobrze zgadza się z obrazem ciągłej czasoprzestrzennej „historii” z teorii względności omówionej w rozdziale drugim. Interpretacja transakcyjna sukces zawdzięcza w dużej mierze odważnemu potraktowaniu tego zagadnienia i oparciu się na aczasowej strukturze świata kwantów ujawnionej przez eksperymenty weryfikujące nierówność Bella.

Chciałbym raz jeszcze podkreślić, że w s z y s t k i e te interpretacje są mitami, protezami wspierającymi naszą wyobraźnię, nasze zrozumienie tego, co się dzieje na poziomie kwantowym, i naszą zdolność do formułowania weryfikowalnych przewidywań. Żadna z nich nie jest jedynie prawdziwa, lecz w s z y s t k i e są realne, nawet wtedy, gdy nie zgadzają się ze sobą. Interpretacja Cramera szczególnie jednak nadaje się do roli mitu naszych czasów; jest łatwa w zrozumieniu i łatwa w użyciu jako narzędzie do konstruowania myślowych obrazów tego, co się dzieje w świecie kwantów. Przy odrobinie szczęścia może ona następnemu pokoleniu fizyków zastąpić interpretację kopenhaską jako standardowy sposób myślenia o fizyce kwantowej.

Z całą pewnością jest to doskonały sposób uczenia fizyki kwantowej początkujących (czyli dla każdego, kto nie został jeszcze zdeprawowany przez interpretację kopenhaską). Jak mówi Cramer:

Odrzucenie interpretacji kopenhaskiej może się okazać szczególnie trudne ze względu na jej tradycyjną rolę w nauczaniu mechaniki kwantowej w ciągu ostatnich pięćdziesięciu lat.

Nie należy jednak lekceważyć znaczenia nowych koncepcji interpretacyjnych w badaniu procesów fizycznych. Doświadczenie z wielu dziedzin fizyki świadczy o tym, że postęp, nowe idee i nowe podejścia są w znacznym stopniu stymulowane przez zdolność do klarownej wizualizacji zjawisk fizycznych¹³¹.

W 1977 roku, omawiając trudności związane ze zrozumieniem wyników eksperymentów kwantowych w kategoriach oddziaływań, w których w zasadzie bierze udział cały wszechświat, Fred Hoyle zauważył: „Któregoś dnia być może się to uda, lecz tylko dzięki jakiejś nielokalnej formie fizyki, tego rodzaju fizyki, która obecnie absolutnie nie cieszy się popularnością”¹³². Zarówno prorocza uwaga Hoyle'a, jak i nadzieje Cramera wydają się urzeczywistniać w takich pracach jak publikacja Chu o naturze grawitacji. Nie jest to zatem koniec historii, lecz zaledwie początek następnego rozdziału w dziejach mechaniki kwantowej. Chciałbym zakończyć tę relację, zwracając uwagę na pełen ironii zbieg okoliczności w historii fizyki.

Spośród wszystkich wybitnych fizyków dwudziestego wieku Richard Feynman najczęściej i najbardziej dobitnie podkreślał zasadniczą niezrozumiałość mechaniki kwantowej w jej standardowej formie. W połowie lat sześćdziesiątych napisał w książce *The Character of Physical Law*:

¹³¹ J. Cramer, *Transactional interpretation*, s. 681.

¹³² F. Hoyle, *The Faces of the Universe* [Oblicza wszechświata], Heinemann, London 1977, s. 128.

Swego czasu można było przeczytać w gazetach, że tylko dwunastu ludzi rozumie teorię względności. Osobiście nie wierzę, że kiedykolwiek tak było. Przez moment tylko jeden człowiek ją rozumiał - ponieważ tylko on wpadł na ten pomysł - zanim ją opublikował. Gdy ludzie przeczytali publikację, to wielu z nich, z pewnością więcej niż dwanaście osób, lepiej lub gorzej rozumiało teorię względności. Myślę jednak, iż można spokojnie stwierdzić, że nikt nie rozumie mechaniki kwantowej. [...] Jeżeli potrafisz się powstrzymać, nie zadawaj sobie pytania: „Jak to jest możliwe?”, bo „wpadniesz” w ślepą uliczkę, z której nikomu nie udało się uciec. Nikt nie wie, jak to jest możliwe¹³³.

Ironia polega oczywiście na tym, że sposób ucieczki z tej ślepej uliczki opiera się na teorii światła, którą sam Feynman stworzył dwadzieścia lat wcześniej, nim wypowiedział powyższą uwagę. Upłynęło jednak jeszcze trzydzieści lat, zanim odkryto ten związek. Interpretacja transakcyjna Johna Cramera może być jedynie mitem naszych czasów, lecz jej wielką zaletą jest fakt, że pozwala zadać pytanie: „Jak to jest możliwe?” i uzyskać prostą i łatwą do zrozumienia odpowiedź, po której nie wpada się w ślepą uliczkę. Czy można więcej wymagać od jakiegokolwiek interpretacji mechaniki kwantowej?

¹³³ BBC Publications, London 1965, s. 129 (książka oparta na wykładach z 1964 roku, przedrukowana przez MIT Press w 1967 roku i wielokrotnie później).

Bibliografia

Oprócz prac, na które powołuję się w przypisach - a są to raczej książki nieco bardziej techniczne lub publikacje naukowe - w kształtowaniu moich wyobrażeń o naturze rzeczywistości kwantowej i fizyki w ogólności szczególnie użyteczne były również (a w niektórych wypadkach zasadniczo wpłynęły na moje poglądy) poniższe pozycje. Podaję także kilka moich książek, ponieważ pokazują one, w jaki sposób rozwijały się moje poglądy w ciągu ostatnich dwudziestu lat.

David Albert, *Quantum Mechanics and Experience* [Mechanika kwantowa a doświadczenie], Harvard University Press, Cambridge, Mass, 1992.

Obrona interpretacji „wielu umysłów” mechaniki kwantowej, lecz według mnie zupełnie nieprzekonująca.

Hans von Baeyer, *Taming the Atom* [Opanować atom], Viking, London 1992.

Całkiem dobre przedstawienie świata atomów i cząstek ilustrowane znakomitymi fotografiami pojedynczych atomów, molekuł DNA i innych cudów mikroświata. Zawiera jednak pewne błędy, między innymi „wyjaśnienie” struktury atomu helu.

Jim Baggott, *The Meaning of Quantum Theory* [Znaczenie teorii kwantowej], Oxford University Press, Oxford 1992.

Nieco techniczna książka, napisana przez fizyka, który ze zdziwieniem odkrył twierdzenie Bella dopiero w 1987 roku, a do tego czasu żył w błogiej nieświadomości kwantowej nielokalności. Jego naiwny zachwyt nad świeżo odkrytymi cudami nadaje książce szczególny koloryt, jeżeli przedrzemy się przez równania.

Ralph Baierlein, *Newton to Einstein* [Od Newtona do Einsteina], Cambridge University Press, Cambridge 1992.

Przeznaczona dla studentów nie specjalizujących się w naukach ścisłych (czyli względnie czytelna dla każdego, kto jest zainteresowany tym tematem), książka ta traktuje o dualnej falowo-korpuskularnej naturze światła, a także stanowi wprowadzenie do szczególnej teorii względności. Jak na podręcznik, książka bardzo przystępna.

J.S. Bell, *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics* [Wypowiedzalne i niewypowiedziane w mechanice kwantowej], Cambridge University Press, Cambridge 1987.

Zbiór wszystkich publikacji Johna Bella o pojęciowych i filozoficznych problemach związanych z teorią kwantową. Niektóre dość łatwe, inne bardzo zaawansowane.

Paul Davies, *Other Worlds* [Inne światy], Pelican, London 1988 (oryginalne wydanie: J.M. Dent, London 1980).

Dobry, choć nieco zdezaktualizowany przegląd idei kwantowych, napisany przed wykonaniem eksperymentu Aspecta. Davies przedstawia w korzystnym świetle interpretację „wielu światów”, a także rozważa antropiczne „koincydencje”, które uczyniły świat takim, jaki jest.

Paul Davies, J.R. Brown (red), *The Ghost in the Atom*, Cambridge University Press, Cambridge 1986 [*Duch w atomie*, przeł. Piotr Amsterdamski, Wydawnictwo CIS, Warszawa 1996],

Książka oparta na serii wywiadów przeprowadzonych dla radia BBC, zawierająca różne interpretacje teorii kwantowej. Wybitni eksperci bronią wzajemnie wykluczających się możliwości, opierając się na tych samych dowodach doświadczalnych! Dobry przykład zamieszania wśród fizyków związanego z poglądami na temat teorii kwantowej.

David Deutsch, *The Fabric of Reality* [Materia rzeczywistości], Viking, London 1995. Bardzo osobisty pogląd na kwantową rzeczywistość oparty na teorii „wielu światów” Hugh Everetta i zawierający pewne intrygujące idee na temat natury czasu.

J.W. Dunne, *An Experiment with Time* [Eksperyment z czasem], wyd. 3, Faber & Faber, London 1934.

Nieco mistyczne omówienie natury czasu, które w jasny sposób pokazuje, że potrzebna jest druga warstwa czasu, aby mierzyć upływ czasu zwykłego, trzecia warstwa, aby mierzyć upływ drugiej i tak dalej *ad infinitum*.

C.W.F. Everitt, *James Clerk Maxwell*, Scribner's, New York 1975. Interesująco i przystępnie napisana historia życia i pracy Maxwella.

J. Fauvel, R. Flood, M. Shortland, R. Wilson (red.), *Let Newton Be!* [Nie przekreślajmy Newtona!], Oxford University Press, Oxford 1988. Bardzo przystępnie napisany zbiór publikacji o Newtonie i jego dziełach.

Richard Feynman, *QED: The Strange Theory of Light and Matter*, Penguin, London 1990 [*QED: osobliwa teoria światła i materii*, przeł. Helena Białkowska, Państwowy Instytut Wydawniczy, Warszawa 1992].

Pierwsze wydanie tej książki ukazało się w 1985 roku. Jest ona oparta na serii wykładów wygłoszonych przez Feynmana w Los Angeles w 1983 roku dla słuchaczy bez przygotowania naukowego. Wspaniały przykład typowego dla Feynmana obrazowego sposobu wyjaśniania, jak „działa” kwantowy świat.

Richard Feynman, *The Character of Physical Law* [Charakter praw fizyki], Penguin, London 1992.

Nowe wydanie książki opublikowanej po raz pierwszy w 1965 roku, opartej na serii wykładów wygłoszonych na Cornell University w 1964 roku, a w 1965 roku pokazanych przez telewizję BBC. Jeden rozdział poświęcony jest teorii kwantowej, lecz warto przeczytać całą książkę - autentyczny „głos” Feynmana.

Richard Feynman, *Six Easy Pieces*, Addison-Wesley, Massachusetts 1995 [*Sześć łatwych kawałków*, przeł. zbior., Prószyński i S-ka, Warszawa 1998]. Sześć początkowych wykładów ze słynnego kursu fizyki Feynmana (patrz poniżej), łącznie ze wstępem do fizyki kwantowej.

Richard Feynman, Robert Leighton, Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, t. 3, Addison-Wesley, Massachusetts 1965) [*Feynmana wykłady z fizyki*, przeł. zbior., Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1972].

Tom słynnego kursu fizyki Feynmana poświęcony teorii kwantowej. Tekst na poziomie uniwersyteckim, dla każdej osoby poważnie zainteresowanej tym tematem.

Richard Feynman, Steven Weinberg, *Elementary Particles and the Laws of Physics* [Cząstki elementarne i prawa fizyki], Cambridge University Press, Cambridge 1987. Zapis dwóch wykładów wygłoszonych w Cambridge w połowie lat osiemdziesiątych ku czci Paula Diraca. Dobrze oddaje sposób myślenia fizyków.

Kathleen Freeman, *Ancilla to the Pre-Socratic Philosophers* [Ancilla do presokratejskich filozofów], Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts 1983. Zawiera fragmenty prac Empedoklesa wspomnianych w rozdziale pierwszym.

James Gleick, *Genius*, Little, Brown, London 1992 [*Geniusz*, przeł. Piotr Amsterdamski, Zysk i S-ka Wydawnictwo, Poznań 1999].

Wyczerpujące studium życia i pracy Feynmana osadzone w kontekście dwudziestowiecznej fizyki.

John Gribbin, *In search of Schrodinger's Cat*, Bantam, New York 1984; Black Swan, London 1984 [*W poszukiwaniu kota Schrödingera*, przeł. Jacek Bieroń, Zysk i S-ka Wydawnictwo, Poznań 1997].

Kończy na tym, od czego zaczyna się niniejsza książka. Najlepszy przewodnik po historii powstania mechaniki kwantowej dla laika (dlaczego miałbym tego nie powiedzieć?).

John Gribbin, *In Search of the Big Bang* [W poszukiwaniu wielkiego wybuchu], Bantam, New York 1986; Black Swan, London 1986.

Standardowa teoria pochodzenia wszechświata osadzona w kontekście koncepcji fizyki kwantowej.

John Gribbin, *In Search of the Edge of Time* [W poszukiwaniu krawędzi czasu], Harmony, New York 1992; Black Swan, London 1992.

Moja relacja o powstaniu teorii względności i jej konsekwencjach, pojęciu czasu i możliwości podróży w czasie.

John Gribbin, *In the Beginning* [Na początku], Little, Brown, New York 1993; Viking, London 1993.

274

Najnowsze koncepcje związane z pochodzeniem wszechświata; dowody na jego „zamknięcie”, co spełnia wymagania teorii absorbera Wheelera-Feynmana.

John i Mary Gribbin, *Time and Space* [Czas i przestrzeń], Dorling Kindersley, London 1994.

Próba wyjaśnienia obu teorii względności Einsteina w prosty i bogato ilustrowany sposób, z minimalną ilością tekstu. Może pomóc zrozumieć niektóre koncepcje przedstawione w rozdziale drugim!

Herman Haken, Anders Karlqvist, Uno Svedin (red.), *The Machine as Metaphor and Tool* [Maszyna jako metafora i narzędzie], Springer-Verlag, Berlin 1993. Zbiór publikacji opracowany na podstawie konferencji, która odbyła się w Abisko w Szwecji w maju 1990 roku, na temat maszyny i jej użycia jako metafory w rozmaitych okolicznościach, także w kontekście naukowego poglądu na świat. Głównie o mózgu, lecz dotyczy także zagadnień, które poruszyłem w rozdziale piątym.

Nick Herbert, *Quantum Reality* [Kwantowa rzeczywistość], Rider, London 1985.

Nieco zdezaktualizowane, lecz bardzo dobrze napisane przedstawienie różnych interpretacji teorii kwantowej.

Roger Jones, *Physics as Metaphor* [Fizyka jako metafora], University of Minnesota Press, Minneapolis, Minnesota 1982.

Opisuje sposób, w jaki fizycy widzą świat, kwestionując powszechnie przyjęte założenia na temat zależności między modelami a rzeczywistością.

Martin Krieger, *Doing Physics* [Robiąc fizykę], Indiana University Press, Bloomington, Indiana 1992.

Poszerzająca horyzonty analiza, która jaśniej i dogłębniej niż jakakolwiek inna znana mi pozycja pokazuje, że fizyka nie tylko posługuje się systemem analogii i metafor, ale nim jest - inaczej mówiąc, jest fikcją. Zwarta argumentacja wymagająca uważnej lektury, po której świat nauki ukazuje się w zupełnie innym świetle.

Thomas Kuhn, *The Structure of Scientific Revolution*, University of Chicago Press, Chicago 1970 [*Struktura rewolucji naukowych*, przeł. Helena Ostromecka, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1968].

Klasyczna pozycja o tym, jak naukowcy pracują i myślą - i dlaczego czasami zmieniają zdanie.

Jean-Pierre Maury, *Newton: Understanding the Cosmos* [Newton: zrozumieć kosmos], Thames & Hudson, London 1992.

Angielskie tłumaczenie francuskiej książki, która ukazała się w 1990 roku. Z pewnością najlepsze wprowadzenie do Newtona i fizyki newtonowskiej. Dobrze napisane, z kolorowymi ilustracjami, a wszystko to na 144 stronach kieszonkowego wydania.

Dugald Murdoch, *Niels Bohr's Philosophy of Physics* [Filozofia fizyki Nielsa Bohra], Cambridge University Press, Cambridge 1987.

Ocena wkładu Bohra w teorię kwantową, ze szczególnym uwzględnieniem jego punktu widzenia na to, co obecnie jest uważane za interpretację kopenhaską. Nielatwa lektura, lecz solidne źródło podstawowych faktów.

Heinz Pagels, *The Cosmic Code* [Kosmiczny szyfr], Michael Joseph, Londyn 1982. Opis dziwów kwantowego świata (w szczególności interpretacji kopenhaskiej) jasno i interesująco napisany przez wybitnego fizyka, zanim nastąpił wzrost zainteresowania alternatywnymi interpretacjami zainspirowany przez eksperyment Aspecta.

Roger Penrose, *The Emperor's New Mind*, Oxford University Press, Oxford 1989 [*Nowy umysł cesarza*, przeł. Piotr Amsterdamski, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996].

Broniąc tezy, że naprawdę inteligentne komputery nie mogą istnieć, Penrose zabiera czytelnika w podróż po świecie współczesnej fizyki, również po teorii kwantowej. Miejscami dosyć trudna, miejscami zabawna, często kontrowersyjna, lecz mimo wszystko warta przeczytania.

Andrew Pickering, *Constructing Quarks* [Konstruując kwarki], Edinburgh University Press, Edinburgh 1984.

Fascynujący zapis historii współczesnej fizyki cząstek, miejscami dosyć trudny. Przedstawia historię i ostateczną (?) teorię nie jako rezultat odkrycia przez naukowców ukrytej prawdy, lecz jako tworzenie przez nich rzeczywistości z eksperymentów i teorii. Książka z pewnością warta polecenia, lecz wymaga uważnej lektury.

William Poundstone, *Labyrinths of Reason* [Labirynty rozumu], Anchor Books, New York 1988. W przystępny sposób opisuje poglądy fizyków na świat.

Ilya Prigogine, Isabelle Stengers, *Order out of Chaos*, Heinemann, London 1984 [*Z chaosu ku porządkowi*, przeł. Katarzyna Lipszyc, Państwowy Instytut Wydawniczy, Warszawa 1990].

Dobre wprowadzenie do idei Prigogine'a o złożoności i o strzałce czasu, lecz miejscami bardzo trudne. Jeszcze trudniejszą wersję napisał sam Prigogine, zatytułowaną *From Being to Becoming* [Od bycia do stawania się] (Freeman, San Francisco 1980).

Koncepcje Prigogine'a zostały przedstawione w serii książek, w których roi się od intrygujących idei, lecz dla mnie stanowią one dosyć trudną lekturę. Na szczęście możliwe związki tych idei ze światem kwantów zostały bardzo jasno omówione przez Alastaira Rae w książce *Quantum Physics: Illusion or Reality?* (patrz poniżej), którą polecam jako krótki przegląd.

Alastair Rae, *Quantum Physics: Illusion or Reality?* [Fizyka kwantowa: iluzja czy rzeczywistość?], Cambridge University Press, Cambridge 1986. Standardowy, dosyć tradycyjny przewodnik dla laika. Zawiera omówienie prac Ilii Prigogine'a, łatwiejsze w odbiorze niż jego książki.

Henry Stapp, *Mind, Matter, and Quantum Mechanics* [Umysł, materia i mechanika kwantowa], Springer-Verlag, Berlin 1993.

Zbiór artykułów Stappa dotyczących zagadnień związanych z teorią kwantową i świadomością (miejscami dosyć trudny). Jego idee są przedstawione kilkakrotnie w nieco inny sposób, więc wytrwały czytelnik w końcu dowie się, o co chodzi. Wart przeczytania przez kogoś, kto chciałby zgłębić tajemnice umysłu i materii, o których wspomniałem w rozdziale czwartym.

John Tyndall, *On light*, Longman, London 1873 [*Sześć wykładów o świetle, wygłoszonych w Stanach Zjedn. w 1872-1873*, przeł. Wiktor Biernacki, Druk. K. Kowalewskiego, Warszawa 1899].

Wspaniała książka oparta na wykładach wygłoszonych przez Tyndalla w trakcie jego pobytu w Stanach Zjednoczonych. Interesujący portret wiktoriańskiej nauki stworzony przez człowieka, który pierwszy zrozumiał, dlaczego niebo jest niebieskie. Wyjaśnienie jego koncepcji znajduje się na stronie 152 [s. 162-167].

Robert Weber, *Pioneers of Science* [Pionierzy nauki], Adam Hilger, Bristol 1988. Portrety zdobywców Nagrody Nobla z fizyki - od pierwszego, Wilhelma Roentgena (1901) do Alexa Mullera i Georga Bednorza (1987).

Richard Westfall, *Never at Rest* [Nigdy w spoczynku], Cambridge University Press, Cambridge 1980.

Definitywna biografia Newtona. Skrócona wersja tej książki została wydana przez Cambridge University Press w 1993 roku pod tytułem *The Life of Isaac Newton* [Życie Isaaca Newtona] i może być łatwiej dostępna, lecz oryginał jest zdecydowanie lepszy.

John Wheeler, Wojciech Żurek, *Quantum Theory and Measurement* [Teoria kwantowa a pomiar], Princeton University Press, Princeton 1983.

Wspaniały zbiór klasycznych publikacji z historii badań nad znaczeniem teorii kwantowej. Jest tu wszystko: paradoks EPR, pierwsze pojawienie się kota Schrödingera, Bohm, Bell i Aspect oraz wielu innych (niestety bez Cramera), wraz z niewielkim komentarzem. W większości bardzo techniczna pozycja, warta przejrzenia w bibliotece.

Arthur Zajonc, *Catching the Light* [Łapiąc światło], Bantam, London 1993. Fascynujący przegląd historii światła - od artystycznych i poetyckich impresji po naukę.