

CHARAKTER  
PRAW  
FIZYCZNYCH

Dotychczas ukazały się:  
Sześć łatwych kawałków  
Sens tego wszystkiego  
Sześć trudniejszych kawałków  
W przygotowaniu:  
QED. Osobliwa teoria światła i materii

Richard P. Feynman  
CHARAKTER  
PRAW  
FIZYCZNYCH  
Przełożył  
Piotr Amsterdamski  
P»-oszy<sup>l</sup> i S-ka  
Warszawa 2000

Tytuł oryginału angielskiego  
THE CHARACTER OF PHYSICAL LAW  
Copyright (c) Richard P. Feynman, 1965  
Introduction copyright (c) Paul Davies, 1992  
All rights reserved  
Projekt okładki  
Dorota Ostaszewska  
Zdjęcie na okładce za zgodą  
Arehives, California Institute of Technology  
ISBN 83-7180-876-3  
Wydawca  
 Prószyński i S-ka SA  
ul. Garażowa 7, 02-651 Warszawa  
Druk i oprawa  
Drukarnia Wydawnicza  
im. W. L. Anczyca SA  
ul. Wadowicka 8  
30-415 Kraków  
Spis rzeczy  
Wprowadzenie  
1. Prawo powszechnego ciężenia  
- przykład prawa fizycznego  
2. Związek między matematyką i fizyką  
3. Wielkie zasady zachowania  
4. Symetria praw fizycznych  
5. Rozróżnienie przeszłości i przyszłości  
6. Prawdopodobieństwo i niepewność  
- kwantowa teoria natury  
7. Poszukiwania nowych praw

#### Wprowadzenie

Wśród historyków nauki bardzo modne są dziś rozważania na temat znaczenia rewolucji naukowych. Każda rewolucja jest dziełem grupy geniuszy, kobiet i mężczyzn, którzy mocą swej inteligencji i wyobraźni zmuszają innych uczonych do odrzucenia starych przesądów i przyjęcia nieznanych, nowych koncepcji. Sam geniusz bywa przedmiotem badań, natomiast mniejszą wagę przywiązuje się zazwyczaj do czegoś, co można by nazwać stylem, choć zmiany stylu pracy miewają również duży wpływ na rozwój nauki, jak tak zwany geniusz. Richard Feynman wyróżniał się zarówno geniuszem, jak i niekonwencjonalnym stylem. Urodził się w 1918 roku, zbyt późno, żeby wziąć udział w Złotym wieku fizyki, kiedy to w ciągu pierwszych trzydziestu lat XX stulecia dwie rewolucyjne teo-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
rie, teoria względności oraz mechanika kwantowa, całkowicie zmieniły nasz obraz świata. Te przełomowe odkrycia stanowiły fundament, na którym wzniesiono gmach nazywany dziś Nową Fizyką. Feynman rozpoczął badania naukowe, gdy te fundamenty były już gotowe, i przyczynił się do rozbudowy "parteru". Jego prace dotyczyły niemal wszystkich dziedzin fizyki i wywarły wielki wpływ na sposób, w jaki fizycy myślą dziś o wszechświecie. Feynman zdobył sławę swoimi pracami na temat cząstek elementarnych, zwłaszcza w dziedzinie elektrodynamiki kwantowej (QED). W istocie to właśnie próby rozwiązania pewnych zagadnień elektrodynamicznych doprowadziły do powstania mechaniki kwantowej. W 1900 roku niemiecki fizyk Max Planck wysunął hipotezę, że w oddziaływaniach z materią promieniowanie elektromagnetyczne, w tym również światło, które wcześniej uważano za fale, zachowuje się tak, jakby się składało z niewielkich porcji energii, czyli właśnie kwantów.

## 8 Charakter praw fizycznych

Te kwanty nazywano fotonami. Na początku lat trzydziestych twórcy mechaniki kwantowej opracowali matematyczną teorię, opisującą emisję i absorpcję fotonów przez cząstki naładowane elektrycznie, na przykład elektrony. Choć elektrodynamika kwantowa w swej pierwotnej postaci osiągnęła pewne sukcesy, jej niedostatki były oczywiste dla wszystkich. Pod koniec lat czterdziestych to właśnie młody Feynman zajął się opracowaniem spójnej elektrodynamiki kwantowej.

Zadanie to wymagało stworzenia teorii zgodnej nie tylko z zasadami mechaniki kwantowej, ale również ze szczególną teorią względności. Te dwie teorie mają postać skomplikowanych układów równań, które rzeczywistość można ze sobą pogodzić i skonstruować zadowalającą elektrodynamikę kwantową. Rozwiązanie tego problemu było jednak trudnym zadaniem, wymagającym ogromnej zręczności matematycznej. Takie podejście zastosowali inni fizycy, pracujący w tym samym okresie. Feynman natomiast poszedł drogą bardziej radykalną, tak radykalną, że dzięki niej był w stanie natychmiast podać odpowiedź na niemal każde pytanie fizyczne, nie rozwiązując przy tym równań!

Aby sobie ułatwić takie nadzwyczajne tryumfy intuicji, Feynman wynalazł prosty system diagramów. Słynne diagramy Feynmana stanowią symboliczny, a zarazem heurystyczny sposób przedstawiania przebiegu oddziaływań między elektronami, fotonami i innymi cząstkami elementarnymi. Obecnie diagramy Feynmana stosowane są rutynowo w wielu różnych obliczeniach, ale na początku lat pięćdziesiątych stanowiły zaskakujące odejście od tradycyjnych metod uprawiania fizyki teoretycznej.

Sformułowanie spójnej elektrodynamiki kwantowej stanowiło milowy krok w rozwoju fizyki, ale wspominam o nim tutaj przede wszystkim dlatego, żeby ukazać, na czym polegał charakterystyczny styl Feynmana, który w okresie powojennym przyniósł rozwiązania wielu problemów z różnych dziedzin fizyki.

Styl Feynmana najlepiej można określić jako mieszanie poszanowania i lekceważenia konwencjonalnych prawd. Fیزی-

## Przedmowa 9

ka to nauka ścisła i żaden fizyk nie może po prostu pominąć zgromadzonej wiedzy, nawet gdyby nie była ona kompletna. Feynman już w młodym wieku doskonale opanował znane zasady fizyki i później zajmował się niemal wyłącznie problemami konwencjonalnymi. Nie był typem geniusza, który ciężko haruje na uboczu oficjalnej nauki i przypadkiem odkrywa fundamentalne, nowe prawdy. Szczególny talent Feynmana polegał na podejściu do znanych problemów w zupełnie nowy, oryginalny sposób. Feynman odrzucał istniejący formalizm

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
i tworzył własne, bardzo intuicyjne metody. Większość fizyków teoretyków opiera się na starannych obliczeniach matematycznych, które są rodzajem przewodnika przy pokonywaniu nieznanego terytorium. W porównaniu z tym metoda Feynmana wydawała się niemal beztraska. Badając interesujące go zagadnienia, Feynman okazywał nie tylko zdrowe lekceważenie zasad rygorystycznego formalizmu. Nie przestrzegał on w ogóle żadnych reguł myślenia lub reguł wymiany poglądów. Trudno wyjaśnić, jakiego geniuszu wymaga takie podejście. Fizyka teoretyczna to jedno z najtrudniejszych ćwiczeń intelektualnych; łączy ona manipulację wielkościami abstrakcyjnymi, których nie można sobie wyobrazić, ze skrajną złożonością matematyczną. Większość fizyków jest w stanie posuwać się do przodu w swych badaniach właśnie dzięki przyjęciu rygorystycznych reguł umysłowej dyscypliny. Natomiast Feynman na pozór całkowicie lekceważył taki kodeks, a jednak otrzymywał nowe wyniki tak łatwo, jakby zrywał dojrzałe owoce z drzewa wiedzy. Styl Feynmana w dużym stopniu wynikał z jego osobowości. Wydawało się, że zarówno w życiu zawodowym, jak i osobistym Feynman traktował świat po prostu jak wspaniałą grę. Przyroda była dla niego zbiorem fascynujących zagadek i wyzwań, podobnie zresztą jak środowisko społeczne. Przez całe życie płatał różne psikusy, traktując władze i uniwersytecki establishment z takim samym brakiem poszanowania, z jakim odnosił się do matematycznego formalizmu. Nie znosił głupoty i łamał obowiązujące reguły, ilekroć uznał, że są one arbitralne lub absurdalne. W jego wspomnieniach można znaleźć

## 10 Charakter praw fizycznych

zabawne opowieści o tym, jak starał się przechytryć kontrwywiad podczas pracy w Los Alamos, jak otwierał sejfy czy podbijał kobiety skandalicznie śmiałym zachowaniem. Podobnie odniósł się do Nagrody Nobla, którą otrzymał za swoje prace z dziedziny elektrodynamiki kwantowej.

Prócz niechęci do formalizmu naukowego, Feynman wykazywał fascynację dziwacznymi i tajemniczymi problemami z innych obszarów. Wielu kolegów zapamiętało jego obsesyjne zainteresowanie zapomnianą krainą Tuwa w Azji Środkowej, o której opowiadał film dokumentalny nakręcony na krótko przed jego śmiercią w 1988 roku. Spośród innych jeszcze pasji Feynmana można by wymienić grę na bębnach bongo, malowanie, odwiedzanie lokali ze striptizem oraz próbę odcyfrowania pisma Majów.

Beztraskie podejście Feynmana do świata i fizyki sprawiło, że potrafił zaskakująco sprawnie przekazywać swoje poglądy. Nie miał cierpliwości, by wykładać w uporządkowany sposób i prowadzić doktorantów w Caltech, gdzie pracował. Natomiast gdy miał na to ochotę, potrafił być błyskotliwym mówcą. Jego wykłady odznaczały się dowcipem, niezwykłą przenikliwością i brakiem poszanowania dla ustalonej wiedzy, zgodnym ze stylem jego badań naukowych.

W połowie lat sześćdziesiątych Feynman zgodził się wygłosić cykl popularnych wykładów na Uniwersytecie Cornella w stanie Nowy Jork. Przedmiotem wykładów miały być prawa fizyki. Wykłady zostały nagrane przez telewizję BBC, a później opublikowane w postaci książki. Przeczytałem ją pod koniec lat sześćdziesiątych, gdy studiowałem fizykę; była to dla mnie fascynująca lektura. Największe wrażenie sprawia zręczność, z jaką Feynman wprowadza trudne pojęcia fizyczne, wychodząc ze skromnych założeń i obywając się przy tym bez matematyki oraz naukowego żargonu. Feynman z wielkim talentem posługuje się analogiami z życia codziennego, aby wyjaśnić istotę głębokich prawd fizycznych, bez zaciemniania ich pozabawionymi znaczenia szczegółami. Nigdy nie zapomnę jego analogii między próbą wytarcia się za pomocą mokrego ręcznika a zasadą zachowania energii.

## Przedmowa 11

O wyborze tematów, które znalazły się w niniejszej książce, nie zdecydowało bynajmniej dążenie do przedstawienia możliwie kompletnego przeglądu fizyki współczesnej. Feynmanowi chodziło raczej o zaprezentowanie swoich poglądów na temat zasadniczych problemów fizyki teoretycznej. Fizyka opiera się na koncepcji praw przyrody. Zgodnie z tą koncepcją istnieje uporządkowany wszechświat, dający się pojąć za pomocą racjonalnego rozumowania. Gdy obserwujemy zjawiska fizyczne, nie dostrzegamy, oczywiście, bezpośrednio praw fizyki. Są one ukryte, zaszyfrowane w badanych zjawiskach. Zapewne najsłynniejszym prawem fizycznym jest prawo powszechnego ciężenia Newtona, które Feynman omawia w pierwszym wykładzie. Większość innych praw opisuje rozmaite siły przyrody, które działają między cząstkami elementarnymi. Istnieją dokładnie cztery takie oddziaływania, a Feynman może się pochwalić, że należy do bardzo nielicznych uczonych w całej historii fizyki, którzy odkryli nowe prawo fizyki, opisujące słabe oddziaływania jądrowe między pewnymi cząstkami elementarnymi.

Fizyka cząstek elementarnych zdominowała życie uczonych należących do pokolenia Feynmana. Imponowała i pociągała naukowców swoimi ogromnymi akceleratorami i na pozór niekończącą się listą nowych cząstek. W swoich badaniach Feynman zajmował się przede wszystkim tymi właśnie problemami. Fizycy usiłowali wprowadzić porządek do menażerii nowych cząstek, odwołując się do reguł symetrii i zasad zachowania. W swoich wykładach na Uniwersytecie Cornella Feynman poświęcił wiele miejsca abstrakcyjnym symetriom i zasadom zachowania obowiązującym w świecie cząstek. Choć od początku lat sześćdziesiątych w fizyce cząstek elementarnych nastąpiły wielkie zmiany, wykłady te zachowały swą aktualność.

Z wykładami o symetrii kontrastuje wykład o asymetrii upływu czasu, czyli o tak zwanym problemie strzałki czasu. Feynman zainteresował się tym problemem już podczas pracy nad rozprawą doktorską w latach drugiej wojny światowej. Jego promotorem był John Archibald Wheeler. Wspólnie zajmo-

## 12 Charakter praw fizycznych

wali się oni próbą skonstruowania takiej elektrodynamiki, w której przeszłość i przyszłość odgrywałyby taką samą rolę. W ten sposób Feynman zmierzył się po raz pierwszy z wyzwaniem elektrodynamiki; dalsze badania w tej dziedzinie przyniosły mu Nagrodę Nobla. Jednak problem strzałki czasu pozostał nierozwiązany i do dziś niepokoi fizyków teoretyków. Jego mistrzowska analiza problemu asymetrii upływu czasu jest klasycznym esejem na ten fascynujący temat.

Wiele idei omawianych w tej książce ma głębokie znaczenie filozoficzne, choć Feynman przez całe życie traktował filozofów bardzo podejrzliwie. Kiedyś miałem okazję zadać mu pytanie na temat natury twierdzeń matematycznych i praw fizyki. Chodziło mi o to, czy jego zdaniem abstrakcyjne prawa matematyczne istnieją w sposób niezależny, jako platońskie idee. Feynman z ożywieniem wywodził, dlaczego tak się właśnie wydaje, ale gdy chciałem go zmusić do zajęcia konkretnego stanowiska filozoficznego, od razu zaczął się wycofywać. Podobną rezerwę wykazał, gdy usiłowałem wyciągnąć z niego opinię na temat redukcjonizmu. Dziś uważam, że Feynman w rzeczywistości nie odnosił się z pogardą do problemów filozoficznych. Podobnie jak umiał stworzyć wspaniałą fizykę matematyczną bez systematycznego stosowania matematyki, tak samo prowadził przenikliwe rozważania filozoficzne, nie zajmując się filozofią w sposób systematyczny. Nie lubił tylko formalizmu.

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)

Jest mało prawdopodobne, by świat ujrzał kiedyś drugiego Richarda Feynmana. Był on człowiekiem swoich czasów. Styl Feynmana pasował do sytuacji, w której w fizyce następowała konsolidacja po rewolucji naukowej i zaczynał się okres badania jej skutków. Powojenna fizyka miała solidne fundamenty, dobrze zarysowane teorie, a równocześnie stwarzała wspaniałe warunki do dalszych badań. Styl Feynmana stał się źródłem inspiracji dla całego pokolenia uczonych. Książka ta jest najlepszym zapisem jego fascynującej wizji świata.  
Adelajda, 1992  
Pani Davies

Prawo powszechnego  
ciężenia - przykład  
prawa fizycznego

Dziwne, ale gdy mam zagrać na bębnach bongo podczas jakiegoś koncertu lub innej imprezy, konferansjer nigdy nie uważa za konieczne wspomnieć, że zajmuję się również fizyką teoretyczną. Wydaje mi się, że jest tak dlatego, iż szanujemy sztukę bardziej niż naukę. Według artystów renesansu ośrodkiem zainteresowania człowieka powinien być sam człowiek, lecz na świecie nie brakuje także innych interesujących rzeczy. Nawet artyści cenią przecież zachody słońca, fale oceaniczne i ruch gwiazd na niebie. Są zatem powody, aby czasem pomówić i o innych rzeczach! Gdy się tym rzeczom przyglądamy, już sama obserwacja bywa dla nas źródłem przyjemności estetycznej. Zjawiska natury mają swój określony rytm, a także pewne reguły, których nie można zrazu dostrzec - ujawnia je dopiero staranna analiza. Owe rytmy i reguły to właśnie prawa fizyczne. W moim cyklu wykładów chciałbym omówić ogólne cechy praw fizycznych; przy czym interesuje mnie wyższy poziom ogólności niż poziom samych praw. Zajmuję się w istocie obrazem natury, jaki uzyskujemy dzięki szczegółowej analizie; mówić będę jednak przede wszystkim o najbardziej ogólnych cechach natury. Rozważania na takie tematy z uwagi na wielką ogólność stają się często nadmiernie filozoficzne. Ludzie mówią bardzo ogólnie w nadziei, że będą zrozumiani. I takie właśnie wywody są uważane za głęboką filozofię. Ja chciałbym mówić bardziej konkretnie i też pragnę, aby mnie wszyscy dokładnie rozumieli, a nie zadowalali się ogólnikami. W pierwszym wykładzie zamiast ograniczyć się do stwierdzeń ogólnych, za-

14 Charakter praw fizycznych

mierzam zaprezentować konkretne prawo fizyczne, tak aby wszyscy znali przynajmniej jeden przykład praw, o których później będę mówił w sposób ogólniejszy. Dzięki temu będę mógł później odwoływać się do tego przykładu, by nadać konkretną postać rozważaniom, które w innym razie byłyby zbyt abstrakcyjne. Wybrałem do tego celu zjawisko grawitacji i prawo powszechnego ciężenia. Sam nie wiem dlaczego. W istocie, jest to jedno z najwcześniejszych odkrytych wielkich praw fizyki i ma ono interesującą historię. Ktoś mógłby na to powiedzieć: "To prawda, ale to już stara historia, wolałbym usłyszeć coś o fizyce nowoczesnej". Mógłbym mówić o nowszej fizyce, ale nie o bardziej nowoczesnej. Współczesna nauka należy dokładnie do tej samej tradycji co prawo powszechnego ciężenia. Odkrycia, o których będę mówił później, różnią się od prawa powszechnego ciężenia nowością, ale nie nowoczesnością. Wcale nie mam wyrzutów sumienia z tego powodu, że będę opowiadał o prawie powszechnego ciężenia, ponieważ opisując jego historię i drogę, która doprowadziła do jego odkrycia, oraz omawiając jego charakter, opowiem o rzeczach jak najbardziej nowoczesnych.

Prawo to ktoś nazwał "największym uogólnieniem, jakie stało się udziałem ludzkiego umysłu". Jak można się domyślić

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)

ze wstępu, interesuje mnie nie tyle ludzki umysł, ile cudowna właściwość natury polegająca na tym, że zachowuje się ona zgodnie z tak eleganckim i prostym prawem jak prawo powszechnego ciężenia. Wobec tego zamierzam mówić nie o tym, że jesteśmy wystarczająco inteligentni, by odkrywać różne prawa przyrody, ale raczej o tym, że ona sama jest tak inteligentna, aby zachowywać się zgodnie z nimi.

Prawo powszechnego ciężenia stwierdza, że między dwoma dowolnymi ciałami działa siła przyciągająca, która jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między nimi i wprost proporcjonalna do iloczynu ich mas. Prawo to możemy wyrazić w postaci wzoru matematycznego:

Prawo powszechnego ciężenia  
15

Mamy tu pewną stałą, pomnożoną przez iloczyn  $m_1 m_2$ , dzieloną przez kwadrat odległości. Jeśli jeszcze dodam, że pod działaniem tej siły ciało przyspiesza, przy czym zmiana prędkości w ciągu sekundy jest odwrotnie proporcjonalna do masy i wprost proporcjonalna do siły, to będzie to już wszystko, co należałoby powiedzieć o prawie powszechnego ciężenia. Wszystko poza tym stanowi matematyczne konsekwencje tych dwóch stwierdzeń. Wiem oczywiście, że nie wszyscy je matematykami, a zatem nie możecie od razu się zorientować, jakie matematyczne wnioski wynikają z tych dwóch faktów. Dlatego chciałbym opowiedzieć krótko historię odkrycia prawa, wyjaśnić, jakie ma ono konsekwencje, a także wpływ wywarło jego poznanie na historię nauki i jakie w sobie tajemnice. Powiem też kilka słów o tym, jak w teorii Einsteina może być, jakie są związki prawa ciężkości z innymi zasadami fizyki.

W wielkim skrócie historia odkrycia prawa powszechnego ciężenia wygląda następująco. Starożytni Grecy uważali, że planety poruszają się po niebie, i doszli do wniosku, iż wszystkie planety, łącznie z Ziemią, krążą wokół niej. Znacznie później do takiego samego wniosku doszedł Kopernik. Stało się to, gdy wszyscy już zapomnieli, że ktoś to odkrył. Następnie należało zbadać, jak planety poruszają się wokół Słońca, jak dokładnie wygląda ich ruch, czy krążą po okręgach, a Słońce znajduje się we wspólnym centrum wszystkich okręgów, czy też zakreślają jakieś inne krzywe - wszystko to poruszają? I tak dalej. Wyjaśnienie tego problemu zabrało sporo czasu. W czasach po Koperniku prowadziły długie debaty, czy planety rzeczywiście krążą wokół Słońca, czy z Ziemią, czy też Ziemia jest środkiem wszechświata, dalej. Pewien astronom, Tycho Brahe znalazł sposób, by rozstrzygnąć tę kwestię. Przyszło mu do głowy, że zapewne byłoby dobrze prowadzić staranne obserwacje i zapisywać, jak dokładnie na niebie widać planety, a może wtedy uda się wbrać właściwą teorię. Na tym polega sedno nowoczesnej teorii Tycho Brahe (1546-1601) - duński astronom.

## 16 Charakter praw fizycznych

Ten pomysł, że należy uważnie przyjrzeć się zjawiskom, odnotować wszystkie szczegóły i mieć nadzieję, iż zgromadzone informacje pozwolą wybrać tę czy inną interpretację teoretyczną, oznaczał początek prawdziwego rozumienia natury. Tak więc Tycho, człowiek bardzo bogaty, właściciel wyspy w pobliżu Kopenhagi, skonstruował tam specjalne stanowiska obserwacyjne, wyposażone w ogromne mosiężne koła, i noc po nocy mierzył pozycje planet z niespotykaną wcześniej dokładnością. Tylko dzięki takiej ciężkiej pracy można się czegoś dowiedzieć. Wszystkie obserwacje zebrane przez Tycho Brahego trafiły później w ręce Keplera, który spróbował przeanalizować da-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
ne i stwierdzić, jak poruszają się planety wokół Słońca. Kepler szukał odpowiedzi na to pytanie metodą prób i błędów. W pewnej chwili sądził już, że znalazł poprawne rozwiązanie: przypuszczał, że planety poruszają się po okręgach, przy czym Słońce nie znajduje się w samym środku okręgów. Następnie jednak zauważył, że jedna planeta - jeśli dobrze pamiętam, był to Mars - porusza się inaczej, niż przewidywał. Różnica wynosiła osiem minut kątowych. Kepler uznał, że Brahe nie mógł popełnić aż tak dużego błędu, a zatem jego własna hipoteza musiała być błędna. To dzięki precyzji pomiarów Brahego Kepler musiał podjąć kolejną próbę i ostatecznie znalazł trzy reguły. Przede wszystkim okazało się, że planety poruszają się po elipsach, przy czym Słońce znajduje się w jednym z ognisk elipsy. Wszyscy artyści znają dobrze elipsę, ponieważ tak wygląda koło widziane w skrócie perspektywicznym. Dzieci rów-

Ryc. 1.1

2 Johannes Kepler (1571-1630)

student Brahego.

- niemiecki astronom i matematyk, asy-

Prawo powszechnego ciężenia 17

prędkość planety

odstęp 5 tygodni

Ryc. 1.2

niez często wiedzą, co to elipsa, ponieważ ktoś im powiedział, że jeśli przewlec nitkę przez pierścionek, umocować jej końce w dwóch punktach, a następnie przełożyć przez pierścionek ołówki, to można narysować elipsę (ryc. 1.1).

Punkty A i B to ogniska elipsy. Planeta porusza się wokół Słońca po elipsie, przy czym Słońce znajduje się w jednym z ognisk. Gdy znany jest już tor planety, nasuwa się pytanie, jak porusza się planeta. Czy porusza się szybciej, gdy jest blisko Słońca? Czy zwalnia, gdy oddala się od Słońca? Kepler znalazł odpowiedzi również na te pytania (ryc. 1.2).

Kepler stwierdził, że jeśli zaznaczymy dwa położenia planety na orbicie w określonym odstępie czasu, powiedzmy trzech tygodni, po czym narysujemy linie (tak zwane promienie wodzące) łączące planetę ze Słońcem, to pole powierzchni zamkniętej orbitą i dwiema liniami przechodzącymi przez wyznaczone punkty na orbicie jest zawsze takie samo, niezależnie od tego, gdzie na orbicie znajduje się planeta. Wobec tego planeta musi poruszać się prędzej, gdy znajduje się blisko Słońca, niż gdy jest daleko, tak aby promień wodzący zawsze w takim samym czasie zakreślał takie samo pole.

Kilka lat później Kepler znalazł trzecią regułę, która nie dotyczy wyłącznie ruchu pojedynczej planety wokół Słońca, lecz wyraża pewien związek między różnymi planetami. Zgodnie z tą regułą czas, jakiego potrzebuje planeta na wykonanie pełnego okrążenia, jest tym większy, im większa jest orbita. Mówiąc ściślej, okres obiegu jest proporcjonalny do pierwiastka kwadratowego z sześcienną wielkością (średniej odległo-

18 Charakter praw fizycznych

ści od Słońca). Kepler znalazł zatem trzy prawa ruchu planet: planety poruszają się po elipsach, w równych odstępach czasu promień wodzący zakreśla zawsze takie samo pole; okres obiegu jest proporcjonalny do wielkiej półosi elipsy podniesionej do potęgi trzy drugie, czyli do pierwiastka kwadratowego z sześcienną wielkością. Te trzy prawa stanowią pełny opis ruchu planet wokół Słońca.

Następnie odpowiedzieć należy na pytanie, dlaczego planety w ogóle krążą wokół Słońca. W czasach Keplera niektó-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)

rzy uważali, że za każdą planetą lecą anioły, machając skrzydłami i popychając ciało niebieskie wokół orbity. Jak się przekonamy, ta odpowiedź jest bliska prawdy, tyle że anioły siedzą z innej strony i popychają planetę w kierunku Słońca. W tym okresie Galileusz badał prawa ruchu zwykłych ciał, z jakimi mamy do czynienia na Ziemi. Badając te prawa, Galileusz przeprowadził wiele doświadczeń, na przykład, by stwierdzić, jak staczają się kulki po równi pochyłej, jak porusza się wahadło, i tak dalej. W ten sposób odkrył on pewną ważną zasadę, tak zwaną zasadę bezwładności: jeśli na ciało w ruchu nie działa żadna siła, to porusza się ono ze stałą prędkością po linii prostej. Trudno w to uwierzyć komuś, kto próbował sprawić, aby ciężka kula toczyła się bez końca, ale gdyby przyjęta idealizacja była poprawna i na kulę nie działały żadne siły, takie jak tarcie o podłoże, rzeczywiście poruszałaby się ona ruchem jednostajnym prostoliniowym.

Następny krok wykonał Newton, który rozważył pytanie: "Jeśli ciało nie porusza się po linii prostej, to co wtedy?". Jego odpowiedź brzmiała: żeby nastąpiła jakakolwiek zmiana prędkości ciała, potrzebna jest siła. Na przykład jeśli popchniemy kulkę zgodnie z kierunkiem ruchu, to kulka przyśpieszy. Jeśli widzimy, że kulka zmienia kierunek ruchu, to widocznie działa na nią jakaś siła skierowana w bok. Siłę można przedstawić w postaci iloczynu dwóch czynników. Jak zmienia się prędkość w ciągu krótkiego czasu? Stosunek zmiany prędkości do czasu to przyśpieszenie. Gdy pomnożymy przyśpieszenie przez współczynnik zwany masą ciała, stanowiący miarę jego bezwładności, otrzymamy siłę. Siłę można zmierzyć. Można na przykład przy-

## Prawo powszechnego ciężenia 19

wch swobodny  
 ODCHYLENIE as> RUCHU  
 PO PROSTEJ  
 •RUCH RZECZYWISTY

Rys. 1.3

mocować kamień do końca sprężyny i zakręcić nim nad głową. Łatwo się wtedy przekonać, że potrzebna jest do tego siła, bo wprawdzie wartość prędkości kamienia jest stała, ale zmienia się jej kierunek. Do tego potrzebna jest siła dośrodkowa, a jej wartość jest proporcjonalna do masy kamienia. Gdybyśmy zatem wzięli dwa różne ciała i zakręcili nimi nad głową z taką samą prędkością i zmierzyli potrzebne do tego siły, okazałoby się, że ich stosunek jest równy stosunkowi mas obu ciał. W ten sposób, mierząc siłę potrzebną do zmiany kierunku prędkości ciała, możemy wyznaczyć jego masę. Newton wywnioskował z tego, że gdy planeta krąży wokół Słońca po okręgu, wówczas niepotrzebna jest żadna siła styczna do jej toru. Gdyby na planetę w ogóle nie działała żadna siła, poruszałaby się ona po prostej. W rzeczywistości jednak planeta nie porusza się po prostej; stale znajduje się bliżej Słońca niż byłaby, gdyby poruszała się po prostej (ryc. 1.3). Innymi słowy, zmiana prędkości planety jest skierowana ku Słońcu. Widzimy zatem, że anioły muszą bić skrzydłami w taki sposób, aby popychać planetę ku naszej gwiazdzie. Nie wiadomo jednak, dlaczego planety "chcą" poruszać się po liniach prostych. Nigdy nie udało się wyjaśnić, dlaczego ciała swobodne podążają po prostej ze stałą prędkością. Nie wiadomo, jakie jest uzasadnienie zasady bezwładności. Wprawdzie w fizyce anioły nie istnieją, ale ruch trwa i żeby planety spadały ku Słońcu, musi działać jakaś siła. Newton potrafił wykazać, że twierdzenie, iż promień planety w równych odstępach czasu zakreśla równe pola, jest prostą konsekwencją założenia, że zmiana prędkości planety jest zawsze skierowana ku Słońcu, nawet jeśli planeta porusza się po elipsie. W następnym wykładzie pokażę szczegółowo, jak to się dzieje.



## 20 Charakter praw fizycznych

Drugie prawo Keplera było zatem dla Newtona potwierdzeniem jego hipotezy, że siła jest skierowana ku Słońcu. Natomiast znajomość zależności okresów obiegu od rozmiarów orbit planet pozwoliła mu stwierdzić, jak siła maleje wraz ze wzrostem odległości. Newton zdołał dowieść, że siła jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości.

Na razie Newton nie powiedział w istocie nic nowego; wyraził tylko prawa Keplera w innym języku. Drugie prawo Keplera jest równoważne stwierdzeniu, że siła jest skierowana ku Słońcu, a trzecie - że siła jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości.

W tym czasie astronomowie obserwowali przez teleskopy księżycy Jowisza, które wyglądały jak mały układ słoneczny. Księżyc zachowują się tak, jakby jakaś siła przyciągała je do Jowisza. Podobnie Księżyc krąży wokół Ziemi, bo działa nań siła ciężenia. Wydaje się, że wszystkie ciała przyciągają się wzajemnie, a zatem następnym krokiem było przyjęcie takiego właśnie uogólnienia. Ziemia przyciąga Księżyc, podobnie jak Słońce przyciąga planety. wiadomo jednak, że Ziemia przyciąga różne przedmioty - wszyscy siedzą mocno na krzesłach, choć może woleliby latać. Fakt, że Ziemia przyciąga różne przedmioty, był dobrze znany, natomiast Newtonowi przyszło do głowy, że być może siła ciężenia, która utrzymuje Księżyc na orbicie, jest tą samą siłą, która powoduje, że ciała spadają. Można łatwo obliczyć, o ile "spada" Księżyc w ciągu jednej sekundy, ponieważ znamy promień jego orbity i wiemy, że jedno okrążenie trwa w przybliżeniu miesiąc. Skoro wiemy, jaką drogę pokonuje Księżyc w ciągu jednej sekundy, możemy obliczyć, o ile "spadła" jego trajektoria poniżej punktu na linii prostej, po której poruszałyby się, gdyby nie krążył tak, jak to rzeczywiście robi. Odległość ta wynosi 1/20 cala (0,13 cm). Księżyc znajduje się sześćdziesiąt razy dalej od środka Ziemi niż my; promień Ziemi wynosi 4000 mil (6400 km), a promień orbity Księżyca 240 000 mil (384 000 km). Jeśli zatem prawo odwrotnej proporcjonalności siły do kwadratu odległości jest słuszne, to ciało na powierzchni Ziemi powinno w ciągu jednej sekundy spaść o 1/20 x 3600 cali, ponieważ siła działająca na Księżyc

## Prawo powszechnego ciężenia 21

jest 60 x 60 razy słabsza niż siła działająca na przedmioty na powierzchni Ziemi. 1/20 cala x 3600 to 16 stóp, a od czasów Galileusza było wiadomo, że ciała na powierzchni Ziemi spadają w ciągu jednej sekundy o 16 stóp (4,90 m). To oznaczało, że Newton miał rację. Teraz nie można się już było cofnąć, ponieważ fakty, które poprzednio wydawały się całkowicie niezależne, a mianowicie okres orbitalny Księżyca i średnica jego orbity, teraz zostały powiązane z odległością, jaką pokonuje w ciągu jednej sekundy ciało spadające blisko powierzchni Ziemi. To było dramatyczne potwierdzenie słuszności rozumowania Newtona.

Newton sformułował jeszcze wiele innych przewidywań.

Potrafił obliczyć, po jakiej orbicie porusza się planeta, na którą działa siła odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości. Udowodnił, że w takim przypadku planety poruszają się po elipsach; bez dodatkowych założeń otrzymał zatem pierwsze prawo Keplera. Potrafił on również prosto wyjaśnić wiele innych zjawisk, na przykład pływów. Przyczyną pływów jest przyciąganie Księżyca. Już wcześniej myśleli o tym różni uczeni, ale nie mogli sobie poradzić z pewną trudnością. Jeśli przyczyną pływów jest siła, z jaką Księżyc przyciąga wodę, co sprawia, że gromadzi się ona po tej samej stronie co Księżyc, to w ciągu doby powinien nastąpić tylko jeden przypływ (ryc. 1.4), a tymczasem dobrze wiadomo, że przypływy nadchodzą w przybliżeniu co 12 godzin, czyli dwa razy na dobę. Według innej szkoły, Księżyc miał "wyciągać" Ziemię z oceanu, a zatem przypływ powinien następować wtedy, gdy Księżyc znaj-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
duje się po przeciwnej stronie niż przybór wody, ale zwolenni-  
cy tej szkoly mieli do rozwiązania identyczną trudność.  
Newton pierwszy zrozumiał mechanizm przypływów. Księżyc  
przyciąga Ziemię i wodę z taką samą siłą, zależną jedynie od  
odległości. Woda w punkcie y znajduje się bliżej Księżyca niż  
sztywna Ziemia, a w punkcie x - dalej. Zatem w punkcie y wo-  
da jest przyciągana do Księżyca z większą siłą niż Ziemia,  
w punkcie x - z mniejszą siłą. Kombinacja tych dwóch czynni-  
ków powoduje dwa przypływy. Należy pamiętać, że Ziemia za-  
chowuje się tak samo jak Księżyc, to znaczy porusza się po  
okręgu. Jaka siła równoważy siłę, z jaką Księżyc przyciąga Zie-

## 22 Charakter praw fizycznych

O Księżyc  
Księżyc częściowo  
odciąga wodę od Ziemi.

Księżyc częściowo  
kryjąca Ziemię z NtX

### Ryc. 1.4

Podobnie jak Księżyc porusza się po okręgu, żeby zrów-  
noważyc przyciąganie Ziemi, tak samo zachowuje się Ziemia.  
Środek tego okręgu znajduje się gdzieś wewnątrz Ziemi. Zie-  
mia i Księżyc krążą wokół wspólnego środka w taki sposób, że  
zostaje zrównoważona siła działająca na Ziemię. Woda  
w punkcie x jest jednak przyciągana nieco słabiej, a w punk-  
cie y nieco mocniej, a zatem wzbiera po obu stronach Ziemi.  
W ten sposób Newton wyjaśnił, dlaczego przypływy nadcho-  
dzą dwa razy na dobę. Jego teoria pozwoliła też wyjaśnić sze-  
reg innych zjawisk, na przykład dlaczego przyciąganie spr-  
awia, że Ziemia jest okrągła, wirowanie zaś powoduje, że nie  
jest idealnie okrągła; dlaczego Księżyc i Słońce są okrągłe,  
i tak dalej.

W miarę rozwoju nauki wzrastała dokładność pomiarów  
i prawo powszechnego ciężenia poddawano coraz surowszym  
sprawdzeniom. Jeden z pierwszych takich sprawdzianów po-  
legał na obserwacjach ruchu księżyców Jowisza. Prowadząc  
tego rodzaju pomiary dostatecznie długo, można sprawdzić,

### Prawo powszechnego ciężenia 23

czy zachowują się one zgodnie z prawami Newtona. Okazało  
się, że tak nie jest. Wydaje się, że księżycy Jowisza czasami  
"śpieszą się" o osiem minut, a czasami się "późnią" w stosun-  
ku do przewidywań wynikających z teorii Newtona. Astrono-  
mowie zwrócili uwagę, że księżycy śpieszą się, gdy Jowisz jest  
blisko Ziemi, a późnią, gdy jest daleko. To wydawało się dość  
dziwne. Pan Rómer<sup>3</sup>, który miał duże zaufanie do prawa po-  
wszechnego ciężenia, doszedł do interesującego wniosku, że  
światło potrzebuje czasu, żeby pokonać drogę od księżycy Jo-  
wisza do Ziemi, a zatem gdy patrzymy na księżycy, widzimy je  
nie w takim stanie, w jakim są teraz, ale w takim, w jakim były  
wcześniej, przy czym różnica jest równa czasowi, jakiego po-  
trzebowало światło na dotarcie do Ziemi. Gdy Jowisz jest bli-  
sko, czas ten jest krótszy niż wtedy, gdy jest daleko. Rómer mu-  
siał zatem wprowadzić odpowiednie poprawki do pomiarów.  
Wykorzystując zmierzone opóźnienie i przyspieszenie ruchu  
orbitalnego księżyców, mógł on wyznaczyć prędkość światła.  
To był pierwszy eksperymentalny dowód, że światło nie roz-  
chodzi się natychmiastowo.\*

Opowiadam o tym, ponieważ przykład ten pokazuje, że  
jedno dobre prawo może posłużyć do znalezienia następnego.

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)

Jeśli mamy zaufanie do określonego prawa, a coś wydaje się z nim sprzeczne, może to zwrócić naszą uwagę na inne zjawisko. Gdybyśmy nie znali prawa powszechnego ciężenia, potrzebowałibyśmy znacznie więcej czasu, żeby zmierzyć prędkość światła, ponieważ wtedy nie wiedzielibyśmy, czego się spodziewać po księżycach Jowisza. Proces ten nabrał charakteru lawiny. Każde nowe odkrycie dostarcza narzędzi do dokonania kolejnych. Ta lawina odkryć toczy się już od czterystu lat i wciąż nie widać, by zwalniała.

3 Olaus Ramer (1644-1710) - duński astronom.

\* Feynmanowska interpretacja wydarzeń historycznych wydaje się wątpliwa, gdyż Remer opublikował swoje wyniki w 1676 roku, jedenaście lat przed ukazaniem się przełomowego dzieła Newtona Principia, Newton zaś nie był bynajmniej znany z przedwczesnego ogłaszania swych odkryć. Kamer wykorzystywał argumenty czysto kinematyczne, a nie dynamiczne (przyp. tłum.).

#### 24 Charakter praw fizycznych

Później zwrócono uwagę na kolejny problem: planety w rzeczywistości nie powinny poruszać się po elipsach, ponieważ zgodnie z prawem powszechnego ciężenia na planety działa nie tylko siłą przyciągania Słońca. Oddziałują one również między sobą, wprawdzie bardzo słabo, ale wystarczająco, aby spowodowało to zaburzenia ich orbit. Początkowo znano trzy duże planety - Jowisza, Saturna i Urana. Fizycy obliczyli zaburzenia doskonałych eliptycznych orbit keplerowskich powodowane przez oddziaływania między tymi planetami. Gdy porównano obliczenia z obserwacjami, okazało się, że Jowisz i Saturn poruszają się zgodnie z przewidywaniami, natomiast Uran zachowuje się jakos dziwnie. To była kolejna okazja, aby wykazać niesłuszność praw Newtona, ale proszę się nie martwić! Dwaj astronomowie, Adams i Le Verrier<sup>4</sup>, niezależnie i niemal równocześnie przeprowadzili rachunki, na których podstawie wysunęli hipotezę, że zaburzenia w ruchu Urana powoduje jakaś nieznaną dotąd planeta. Następnie obaj napisali do obserwatoriów: "Proszę skierować teleskop na następujący punkt na niebie, a znajdziecie tam nową planetę". "Co za absurd! - stwierdzono w jednym obserwatorium. - Jakiś facet Uczy coś ołówkiem na papierze i myśli, że może nas pouczać, gdzie szukać nowej planety". W innym obserwatorium... hm, tamtejsza administracja działała inaczej i dzięki temu udało im się znaleźć Neptuna!

W mniej odległej przeszłości, na początku XX wieku, stało się jasne, że Merkury również nie porusza się dokładnie tak jak powinien. To był poważny problem. Anomalię orbity Merkurego wyjaśnił dopiero Einstein, który wykazał, że prawo powszechnego ciężenia Newtona nie jest w pełni słuszne i trzeba je zmodyfikować.

Pojawia się pytanie, jaki jest zakres ważności prawa powszechnego ciężenia. Czy obowiązuje ono też poza Układem Słonecznym? Zdjęcie 1 dowodzi, że prawo powszechnego ciężenia obowiązuje również w szerszej skali. Widzimy serię trzech zdjęć pewnego układu podwójnego. Na szczęście na 4 John Couch Adams (1819-1892) - astronom teoretyk. Urbain Le Verrier (1811-1877) - francuski astronom.

#### Prawo powszechnego ciężenia 25

zdjęciach widać jeszcze trzecią gwiazdę, tak że możecie być pewni, iż gwiazdy tworzące układ podwójny naprawdę krążą po orbitach. W przeciwnym razie można by podejrzewać, że ktoś obrócił zdjęcie, co łatwo można zrobić z fotografiami astronomicznymi. Gwiazdy naprawdę krążą; rycina 1.5 przedstawia ich orbitę. Jest oczywiste, że gwiazdy się przyciągają i krążą po eliptycznych orbitach, tak jak należało oczekiwać. Rysunek przedstawia szereg pozycji gwiazdy, która krąży zgodnie z ruchem wskazówek zegara. Wszystko tu wygląda wspaniale, dopóki nie zauważycie, jeśli jeszcze nie zwróciliście

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
na to uwagi, że środek nie znajduje się w ognisku elipsy, ale wyraźnie z boku. Czy zatem tutaj prawo powszechnego ciężenia nie obowiązuje? Obowiązuje, ale Bóg nie podarował nam orbity widocznej równo z góry; oglądamy ją nieco pod kątem. Można wyciąć z papieru elipsę, zaznaczyć jej ogniska, po czym obejrzeć jej rzut. Jak łatwo się przekonamy, rzut ogniska niekoniecznie pokrywa się z ogniskiem obrazu. Orbita gwiazdy wygląda tak dziwnie, ponieważ jest ustawiona skośnie. Co można powiedzieć o większych odległościach? W układzie podwójnym siła przyciągania działa między dwiema gwiazdami. Czy siła ta działa na większą odległość niż dwie lub trzy średnice Układu Słonecznego? Zdjęcie 2 przedstawia obiekt o rozmiarach 100 000 razy większych niż nasz układ planetarny; składa się on z ogromnej liczby gwiazd. Duża biała plama nie przedstawia jednego obiektu. Wygląda tak wyłącznie z powodu niedostatecznej zdolności rozdzielczej instrumentu. W rzeczywistości składa się z bardzo wielu maleńkich, wyraźnie oddzielonych od innych jasnych plamek, takich samych jak obrazy gwiazd. Gwiazdy nie zderzają się między sobą, lecz poruszają się wewnątrz gromady po bardzo skomplikowanych trajektoriach. Jest to jedno z najpiękniejszych zjawisk na niebie, równie cudowne jak fale morskie i zachody słońca. Wyraźnie widać rozkład materii w gromadzie. Gromada kulista nie rozpada się dzięki przyciąganiu grawitacyjnemu między gwiazdami. Obserwacje rozkładu materii i odległości między gwiazdami pozwalają zbadać siły działające między gwiazdami... Oczywiście okazuje się, że w przybliżeniu

## 26 Charakter praw fizycznych

21 lipca 1908

wrzesień 1915

10 lipca 1920

Zdjęcie 1. Trzy zdjęcia tego samego układu podwójnego wykonane w ciągu 12 lat.

## Prawo powszechnego ciężenia 27

Zdjęcie 2. Gromada kulista.

Zdjęcie 3. Galaktyka spiralna.

## 28 Charakter praw fizycznych

Zdjęcie 4. Gromada galaktyk.

Zdjęcie 5. Mgławica gazowa.

## Prawo powszechnego ciężenia 29

Zdjęcie 6. Dowód powstawania nowych gwiazd.

## 30 Charakter praw fizycznych

270°

0"      2"      4"      6"      8"      10"      12"

skala

Ryc. 1.5

niem siła ta jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości. Obliczenia i obserwacje nie są tu oczywiście nawet w przybliżeniu tak dokładne, jak w przypadku Układu Słonecznego. Idźmy dalej, grawitacja ma jeszcze większy zasięg. Gromada kulista to tylko niewielki punkcik na zdjęciu 3, przedstawiającym dużą galaktykę spiralną. Jest oczywiste, że ta struktura istnieje dzięki temu, że utrzymuje ją w całości jakaś siła, a jedyną rozsądną "kandydatką" jest tu grawitacja. W układach o takiej wielkości nie możemy sprawdzić, czy obowiązuje prawo odwrotnej proporcjonalności siły do kwadratu odległości, ale wydaje się rzeczą oczywistą, że siła grawitacji działa także w tych ogromnych skupiskach gwiazd - galaktyki mają średnicę od 50 tysięcy do 100 tysięcy lat świetlnych, podczas gdy odległość Ziemia-Słońce wynosi tylko osiem minut świetlnych. Zdjęcie 4 dowodzi, że w rzeczywistości zasięg siły grawitacji jest jeszcze większy. Na zdjęciu widzimy gromadę

Prawo powszechnego ciążenia 31  
galaktyk. Tworzą one gromadę, podobną do gromady gwiazd, ale tym razem elementami gromady są takie maleństwa, jak to na zdjęciu 3.

W ten sposób doszliśmy do odległości równej jednej dziesiątej, a może jednej setnej rozmiarów wszechświata, maksymalnej skali, dla której dysponujemy dowodami działania siły ciążenia. Ziemskie grawitacja nie ma żadnego określonego maksymalnego zasięgu działania, choć w gazetach można często przeczytać, że coś wydostało się poza pole grawitacyjne Ziemi. Wraz ze wzrostem odległości siła ciążenia staje się coraz słabsza - maleje czterokrotnie, kiedy dystans się podwaja - aż wreszcie ginie wśród sił pochodzących od innych gwiazd. Gwiazdy z naszego otoczenia przyciągają inne gwiazdy, dzięki czemu istnieje Galaktyka, a cała Galaktyka przyciąga inne galaktyki, dzięki czemu istnieje nadrzędna struktura: gromada galaktyk. Ziemskie pole grawitacyjne nigdzie się nie kończy, tylko stopniowo maleje, zgodnie z precyzyjnym prawem, docierając aż do krańców wszechświata.

Prawo powszechnego ciążenia różni się od wielu innych praw. Rzecz jasna, ma ono bardzo duże znaczenie dla maszynierii wszechświata; znajduje w niej wiele praktycznych "zastosowań". Jednak - rzecz szczególna - z naszego punktu widzenia, w porównaniu z innymi prawami fizyki, znajomość prawa powszechnego ciążenia nie jest szczególnie użyteczna. Pod tym względem wybrany przeze mnie przykład jest nietypowy. Nawiasem mówiąc, kiedy wybieramy jakieś prawo fizyczne, jest rzeczą niemożliwą znaleźć takie, które pod jakimś tam względem nie byłoby nietypowe. To jeden z cudów świata! Jedyne zastosowania prawa powszechnego ciążenia, jakie przychodzą mi do głowy, dotyczą badań geofizycznych, przewidywania pływów, a w naszych czasach również dokładnego obliczania ruchu satelitów i sond kosmicznych. Dla naszych czasów równie charakterystyczne jest zastosowanie tego prawa do dokładnego przewidywania pozycji planet - co przydaje się astrologom publikującym horoskopy w gazetach. Żyjemy w dziwnym świecie - ogromny rozwój mechaniki nieba służy między innymi wspieraniu nonsensu, ciągnącego się już od ponad 2000 lat.

32 Charakter praw fizycznych

Muszę wspomnieć o ważnych zjawiskach, mających rzeczywisty wpływ na zachowanie wszechświata, w których grawitacja odgrywa decydującą rolę. Jednym z bardziej interesujących zjawisk tego rodzaju jest proces powstawania nowych gwiazd. Zdjęcie 5 przedstawia mgławicę gazową w naszej Galaktyce; mgławica nie składa się z gwiazd: jest wielką chmurą gazu. Czarne plamy to obszary, w których gaz uległ kom-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)

presji i zaczął się zapadać grawitacyjnie. Być może proces ten został zainicjowany przez fale uderzeniowe, ale później o jego przebiegu zdecydowała grawitacja. Pod wpływem siły ciężenia w mgławicach powstają coraz większe skupiska gazu i pyłu; skupiska zapadają się, rośnie temperatura, materia zaczyna promieniować i tak powstają gwiazdy. Na zdjęciu 6 widzimy dowody powstawania nowych gwiazd. Tak więc gwiazdy rodzą się, gdy pod wpływem grawitacji powstają dostatecznie duże skupiska gazu. Później niektóre gwiazdy wybuchają, wyrzucając w przestrzeń kosmiczną gaz i pył, po czym cały proces się powtarza. Brzmi to niemal jak opowieść o wiecznie poruszającej się maszynie. Jak już mówiłem, siła ciężenia ma nieskończony zasięg, ale Newton twierdził, że wszystkie ciała przyciągają się wzajemnie. Czy tak jest naprawdę? Czy możemy to sprawdzić bezpośrednio, zamiast obserwować konsekwencje przyciągania się planet? Odpowiedni eksperyment przeprowadził Cavendish<sup>5</sup>; użył do tego urządzenia przedstawionego na rycinie 1.6. Cavendish zawiesił na bardzo cienkim włóknie z kwarcu poprzeczkę z dwiema masami na końcach, po czym ustawił w pobliżu dwie duże kule z ołowiu, tak jak to widać na rysunku. Przyciąganie się kul powinno spowodować niewielkie skrócenie włókna. Oczywiście, siła działająca między takimi ciałami jest bardzo mała, ale Cavendish zdołał ją zmierzyć. Jak stwierdził, w ten sposób "zważył Ziemię". Zgodnie z pedantycznymi obyczajami, jakie dziś obowiązują, student, który powiedziałby coś takiego, zasłużyłby na reprimendę. Obecnie powiedzielibyśmy raczej, że Cavendish "wyznaczył masę Ziemi". Cavendish zmie-

5 Henry Cavendish (1731-1810) - angielski fizyk i chemik.

Prawo powszechnego ciężenia 33

•Λ,ΛΛΛΛΛΛ/ΛwyΛ/Λ,

Ryc. 1.6

rzył bezpośrednio siłę, obie masy i odległość, a zatem mógł wyznaczyć stałą grawitacji  $G$ . Można powiedzieć: "Dobrze, ale mamy tu do czynienia z identyczną sytuacją. Znamy siłę ciężenia, masę przyciąganego ciała i odległość, ale nie znamy masy Ziemi ani stałej  $G$ , a tylko ich iloczyn". Doświadczenie Cavendisha pozwala jednak wyznaczyć stałą  $G$ ; następnie korzystając ze znajomości siły przyciągania, można już wyznaczyć masę Ziemi. Innymi słowy, eksperyment ten po raz pierwszy pozwolił pośrednio wyznaczyć ciężar, czy też masę kuli, na której stoimy. To wspaniałe osiągnięcie! Myślę, że właśnie dlatego Cavendish stwierdził, że "zważył Ziemię", a nie tylko "określił stałą w prawie powszechnego ciężenia". Nawiasem mówiąc, jednocześnie zważył on również Słońce i inne ciała astronomiczne, ponieważ z obserwacji znamy iloczyn  $G$  i masy Słońca. Jest jeszcze jeden bardzo interesujący test prawa powszechnego ciężenia; chodzi w nim o sprawdzenie, czy ciężar jest dokładnie proporcjonalny do masy i czy przyspieszenie, ruch, jaki powoduje siła, czyli zmiany prędkości, są odwrotnie proporcjonalne do masy. Jeśli tak, to dwa ciała o różnych masach poruszałyby się w polu grawitacyjnym z takim samym przyspieszeniem. Inaczej mówiąc, dwa ciała w próżni, niezależnie od masy,

34 Charakter praw fizycznych

spadałyby na ziemię z takim samym przyspieszeniem. Nawiązujemy tu do starego doświadczenia Galileusza, które podobno wykonał, korzystając z Krzywej wieży w Pizie. Oznacza to, na przykład, że przedmiot w sztucznym satelicie krąży wokół Ziemi po takiej samej orbicie jak przedmiot na zewnątrz, a zatem wisi w środku kabiny. To, że ciężar jest dokładnie proporcjonalny do masy, a przyspieszenie dokładnie odwrotnie proporcjonalne, ma dalsze bardzo interesujące konsekwencje.

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)

Jak dokładnie zostało to sprawdzone? w 1909 roku uczony nazwiskiem Eótvós<sup>6</sup> przeprowadził odpowiednie pomiary, a ostatnio taki eksperyment wykonał Dicke<sup>7</sup>, przy czym otrzymał on znacznie dokładniejsze wyniki. Obecnie wiemy, że masa grawitacyjna i masa bezwładna są sobie równe z dokładnością do jednej części na 10 miliardów. Siły są tu ściśle proporcjonalne do masy. Jak można wykonać tak dokładne pomiary? Przypuśćmy, że chcielibyśmy to sprawdzić dla siły przyciągania Słońca. Wiemy, że Słońce przyciąga nas wszystkich, a również Ziemię, ale przypuśćmy, że chcemy sprawdzić, czy przyciąganie jest ściśle proporcjonalne do masy bezwładnej. Eksperyment taki został najpierw wykonany dla drewna sandałowego, później dla miedzi i ołowiu; obecnie używa się do tego celu polietylenu. Ziemia krąży wokół Słońca, a zatem na wszystkie ciała działa siła bezwładności, która jest proporcjonalna do masy bezwładnej. Jednocześnie ciała te są przyciągane przez Słońce, przy czym siła przyciągania jest proporcjonalna do masy grawitacyjnej. Jeśli zatem współczynnik proporcjonalności masy bezwładnej do grawitacyjnej nie jest ściśle taki sam dla wszystkich ciał, to gdy umieścimy dwa różne ciała na końcach pręta i zawiesimy ten pręt na cienkim włóknie z kwarcu, tak jak w doświadczeniu Cavendisha, pręt powinien się obrócić, powodując skręcenie włókna. Tak się jednak nie dzieje. Dzięki temu wiemy z ogromną dokładnością, że ciężar ciała jest dokładnie proporcjonalny do współczynnika bezwładności, czyli do masy.

<sup>6</sup> Baron Roland von Eótvós (1848-1919) - węgierski fizyk.

<sup>7</sup> Robert Henry Dicke - amerykański fizyk.

Prawo powszechnego ciężenia 35

Jedna rzecz jest tu szczególnie interesująca. Prawo odwrotnej proporcjonalności do kwadratu odległości pojawia się w wielu dziedzinach - na przykład w elektryczności. Elektryczność również powoduje pojawienie się siły odwrotnie proporcjonalnej do kwadratu odległości, tyle że ta siła działa między ładunkami, a nie masami. Można zatem przypuszczać, że zależność siły od kwadratu odległości ma jakieś głębsze znaczenie. Nikomu jednak dotąd nie udało się stworzyć teorii, w której grawitacja i elektryczność byłyby różnymi aspektami tego samego oddziaływania. Obecnie znane nam prawa fizyczne stanowią zbiór różnych twierdzeń, które niezbyt dobrze do siebie pasują. Nie znamy jednej teorii, z której można by wyprowadzić wszystkie prawa; zamiast tego mamy kilka elementów, które nie są idealnie dopasowane. Właśnie dlatego w moich wykładach zamiast opowiadać o jakimś głównym prawie fizycznym, muszę mówić o różnych wspólnych cechach wszystkich praw. Nie rozumiemy jeszcze w pełni związków między różnymi prawami. Zadziwiający jednak, że mają one pewne wspólne cechy! Przyjrzyjmy się na przykład prawu Coulomba. Chodzi w nim o to, że siła działająca między ładunkami jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości. Godne uwagi jest jednak to, że siły elektrostatyczne są bez porównania silniejsze niż grawitacyjne! Fizycy, którzy zechcieliby przedstawiać elektryczność i grawitację jako różne aspekty jednego zjawiska, natrafiają tu na kłopot. Elektryczność jest bowiem tyle razy mocniejsza od grawitacji, że trudno jest uwierzyć, aby miały wspólne "pochodzenie". Jak mogę stwierdzić, że jedna siła jest mocniejsza od drugiej? To przecież zależy od ładunku i masy. Nie można określić siły grawitacji, mówiąc: Jeśli wezmę ciało o takiej a takiej wielkości", ponieważ to człowiek określa tu wielkość ciała. Jeśli chcemy znaleźć coś, co jest dziełem natury - jej własne liczby niemianowane, które nie mają nic wspólnego z calami i latami, czy też innymi tworzonymi przez nas wielkościami - możemy to zrobić następująco. weźmy jakąś cząstkę elementarną, taką jak elektron (każda cząstka da inny wynik, ale dla przykładu wybierzmy elektron). Dwa elektrony odpychają się elektrycznie, ponieważ mają jednakowe ładunki, oraz przyciągają się grawita-

i

### 36 Charakter praw fizycznych

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Ryc. 1.7  
 ^  
 / ""  
 00, 000, 000, 000 00  
 o  
 o  
 ,o  
 P  
 .00° •<00  
 o  
 Q  
 o  
 °0,  
 ^oooooa.

Ryc. 1.7. Oba rodzaje sił są tu odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości. Pytanie: jaki jest stosunek siły grawitacyjnej do elektrycznej? Odpowiedź przedstawia rycina 1.7. Stosunek tych dwóch sił wyraża liczba mająca 42 cyfry. Tu kryje się wielka tajemnica. Jakże może być pochodzenie tak wielkiej liczby? Gdybyśmy kiedyś znaleźli jednolitą teorię grawitacji i elektryczności, jak wytłumaczyłaby ona dysproporcję sił? Jakie równanie ma rozwiązanie opisujące taki fantastyczny stosunek obu oddziaływań? Uczni szukali, gdzie jeszcze można znaleźć tego rodzaju liczby. Jeśli ktoś chce otrzymać dużą liczbę, może na przykład wziąć stosunek rozmiarów wszechświata do średnicy protonu. Zaskakujące, ale ta liczba również ma 42 cyfry. W ten sposób pojawiła się interesująca hipoteza, że stosunek siły elektrycznej do grawitacyjnej jest taki sam, jak promienia wszechświata do średnicy protonu. Jednak wszechświat stale się rozszerza; z takiej hipotezy wynikałoby zatem, że stała grawitacji  $G$  zależy od czasu. Nie jest to wykluczone, ale też żadne obserwacje nie

### Prawo powszechnego ciążenia 3 7

wskazują, by tak było rzeczywiście. Przeciwnie, pewne poszlaki sugerują, że stała grawitacji nie zależy od czasu, a zatem tajemnica tej ogromnej liczby wciąż czeka na wyjaśnienie.

By skończyć z teorią grawitacji, muszę jeszcze wspomnieć o dwóch sprawach. Przede wszystkim Einstein musiał zmodyfikować prawo powszechnego ciążenia, tak aby było zgodne z zasadami teorii względności. Jedną z tych zasad stwierdza, że żaden efekt nie może się rozchodzić z nieskończoną prędkością: tymczasem zgodnie z prawem powszechnego ciążenia Newtona siła grawitacji działa natychmiast na dowolną odległość. Einstein zmodyfikował prawo Newtona. Poprawki Einsteina prowadzą do bardzo subtelnych efektów. Na przykład, skoro wszystkie masy spadają, to światło również powinno spadać, ponieważ światło ma energię, która jest równoważna masie. Oznacza to, że promień światła, przelatując w pobliżu Słońca, ulega ugięciu. Również siła przyciągania zmienia się nieco inaczej w zależności od odległości, przy czym zmiana jest akurat taka, że pozwala wyjaśnić niewielką anomalię orbity Merkurego. Druga sprawa dotyczy praw obowiązujących w bardzo małej skali. Wiadomo, że zachowaniem materii w bardzo małej skali rządzą inne prawa niż w dużej skali. Nasuwa się zatem pytanie, jak wyglądają oddziaływania grawitacyjne w małej skali. Chodzi o znalezienie kwantowej teorii grawitacji. Obecnie nie znamy kwantowej teorii grawitacji. Nikomu nie udało się sformułować w pełni udanej teorii grawitacji zgodnej z zasadą nieoznaczoności i innymi zasadami mechaniki kwantowej.

Moglibyście powiedzieć teraz coś takiego: "Dobrze, powiedział pan, jak się przejawia siła ciążenia, ale czym jest gra-



Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
witacja? Jaka jest jej przyczyna? Co to takiego? Czy chce pan powiedzieć, że planeta patrzy na Słońce, mierzy odległość, oblicza odwrotność kwadratu odległości i następnie porusza się zgodnie z prawem powszechnego ciążenia?". Rzeczywiście, wprowadziłem przedstawiłem matematyczny wzór, ale nie powiedziałem jeszcze nic o mechanizmie działania grawitacji. W następnym wykładzie, zatytułowanym Związek między matematyką i fizyką, będę mówił o możliwości podania takiego wyjaśnienia.

### 38 Charakter praw fizycznych

Na zakończenie dzisiejszego wykładu chciałbym podkreślić, że istnieją wspólne cechy łączące prawo powszechnego ciążenia i inne prawa fizyczne, o których już wspominałem. Po pierwsze, prawo to ma postać matematyczną. Inne prawa również wyrażamy w postaci wzorów. Po drugie, prawo ciążenia nie jest ściśle; Einstein musiał je zmodyfikować, ale wiemy, że jego ogólna teoria względności też nie jest w pełni poprawna, ponieważ nie uwzględnia efektów kwantowych. Inne prawa fizyczne również nie są zupełnie ściśle! Zawsze gdzieś kryje się tajemnica; wszystkie prawa mają ograniczony zakres ważności; zwykle tu i tam trzeba jeszcze przy nich pomajstrować. Nie twierdzą, że wynika to z cech samej natury, jest to jednak niewątpliwie wspólna cecha wszystkich znanych dziś praw fizycznych. Być może, wynika to z ograniczeń naszej wiedzy. Jednak największe wrażenie robi prostota prawa powszechnego ciążenia. Łatwo można sformułować zasady teorii grawitacji, i to tak precyzyjnie, by nie było żadnych niejasności. Teoria grawitacji jest prosta i dlatego jest piękna. Ma prostą strukturę. Nie twierdzą, że jest prosta w użyciu - obliczenie trajektorii planet z uwzględnieniem oddziaływań między nimi może być całkiem skomplikowane, a przewidzenie, jak poruszają się gwiazdy w gromadzie kulistej, z pewnością wykracza poza nasze możliwości. Teoria jest trudna w użyciu, ale jej struktura czy też logika jest bardzo prosta. Jest to zarazem wspólna cecha wszystkich praw fizycznych; wszystkie mają prostą postać, choć ich zastosowanie bywa skomplikowane. Ostatnią ważną cechą teorii grawitacji jest jej uniwersalność. Prawo powszechnego ciążenia obowiązuje w ogromnym zakresie odległości. Newton chciał wyjaśnić budowę Układu Słonecznego, ale jego prawo pozwala przewidzieć również wynik doświadczenia Cavendisha, choć model Cavendisha, składający się z przyciągających się kul, należałoby powiększyć dziesięć bilionów razy, by dorównał wielkością Układowi Słonecznemu. Przechodząc do skali jeszcze dziesięć bilionów razy większej, ujrzymy, że galaktyki przyciągają się z siłą działającą zgodnie z tym samym prawem. Natura tką swoje wzory najdłuższymi niciami, dzięki czemu każdy niewielki fragment tkaniny ujawnia strukturę całego arrasu.

### Związek między matematyką i fizyką

Gdy myślimy o możliwych zastosowaniach matematyki i fizyki, w naturalny sposób dochodzimy do wniosku, że matematyka może być przydatna, gdy mamy do czynienia z dużą liczbą obiektów w złożonych sytuacjach. Na przykład w biologii opis wpływu wirusa na bakterie nie poddaje się matematyzacji. Pod mikroskopem widzimy, jak wijący się wirus znajduje pewien punkt na dziwnie ukształtowanym ciele bakterii - bakterie mają różne kształty - po czym może wstrzykuje jej swój DNA, a być może tego nie robi. Gdybyśmy jednak podjęli eksperyment z milionami wirusów i bakterii, wówczas moglibyśmy dużo się o nich dowiedzieć, obliczając wielkości średnie. Korzystając z matematyki do obliczania średnich, możemy stwierdzić, czy w bakteriach rozwijają się wirusy, czy powstają nowe szczepy i jaki jest ich wzajemny udział procentowy. W ten sposób można badać genetykę, mutacje i tak dalej.

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)

Weźmy jeszcze jeden banalny przykład. Wyobraźmy sobie ogromną szachownicę do gry w warcaby. Żaden pojedynczy ruch nie ma charakteru matematycznego; w ostateczności można by go przedstawić w postaci bardzo prostej operacji matematycznej. Można sobie zarazem wyobrazić, że gdy szachownica jest bardzo duża, a gracze dysponują ogromną liczbą pionków, analiza ruchów, odróżnienie dobrych posunięć od złych, wymaga głębokiego rozumowania, przy czym ktoś musiałby wcześniej sformułować zasady takiej analizy. W ten sposób powstaje matematyczna teoria gry, oparta na abstrakcyjnym rozumowaniu. Innym przykładem jest działanie przełączników komputera. Gdy mamy jeden przełącznik, może on być włączony lub wyłączony i nie ma tu miejsca na rozważania matematyczne, choć matematycy często zaczynają swoje

#### 40 Charakter praw fizycznych

wywody od tego punktu. Gdy jednak mamy tak skomplikowany układ przełączników i połączeń jak właśnie w komputerze, analiza jego działania wymaga już matematyki.

Chciałbym od razu stwierdzić, że matematyka bardzo przydaje się w fizyce, gdy szczegółowo analizujemy skomplikowane zjawiska, ponieważ podstawowe reguły gry mają tu charakter matematyczny. Zagadnieniu temu poświęciłbym znacznie więcej czasu, gdybym miał mówić wyłącznie o związkach między matematyką i fizyką. Mój cykl wykładów poświęcony jest jednak prawom fizycznym. Nie mam czasu, żeby zajmować się skomplikowanymi sytuacjami; muszę przejść od razu do podstawowych praw.

Wróćmy do naszego przykładu gry w warcaby: podstawowe prawa to reguły określające dopuszczalne posunięcia. Matematyka przydaje się do analizy złożonych pozycji i znajdowania ruchów najlepszych, ale sformułowanie prostych, podstawowych praw określających dopuszczalne posunięcia nie wymaga przecież matematyki; równie dobrze można to osiągnąć, korzystając ze zwykłego języka.

Zadziwiająca cechą fizyki jest to, że sformułowanie praw podstawowych również wymaga matematyki. Podam tu dwa przykłady. Przy pierwszym matematyka jest w istocie zbyteczna, przy drugim zaś nieodzowna. Mamy w fizyce tak zwane prawo Faradaya, które powiada, że podczas elektrolizy ilość substancji zbierającej się na elektrodach jest proporcjonalna do natężenia prądu i czasu jego przepływu. Inaczej mówiąc, ilość substancji zgromadzonej na elektrodach jest proporcjonalna do całego ładunku elektrycznego, który przepłynął przez układ. To brzmi dość matematycznie, ale w rzeczywistości chodzi o to, że każdy elektron przepływający przez drut przenosi taki sam ładunek. Przyjmijmy na przykład, że osadzenie jednego atomu na elektrodzie wymaga przejścia jednego elektronu. Liczba osadzonych atomów jest zatem dokładnie równa liczbie elektronów, które przepłynęły, a więc jest proporcjonalna do całkowitego ładunku. Takie pozornie matematyczne prawo nie ma żadnych głębszych podstaw i nie wymaga specjalnej znajomości matematyki. To, że jeden elektron przypada na jeden

#### Związek między matematyką i fizyką 41

atom na elektrodzie, jest zapewne stwierdzeniem matematycznym, ale nie o takiej matematyce zamierzam tutaj mówić.

Dla porównania weźmy teraz prawo powszechnego ciężarstwa Newtona, którego różne aspekty omawiałem w poprzednim wykładzie. Napisałem wtedy równanie

$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$

tylko po to, aby zaimponować wszystkim szybkością, z jaką można przekazać informacje, posługując się symbolami matematycznymi. Powiedziałem, że siła ciężarstwa jest proporcjonalna do iloczynu mas obu ciał i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między nimi. w wyniku działania sify

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)

zmienia się prędkość ciała, przy czym zmiana jest skierowana zgodnie z kierunkiem działania siły, a jej wielkość jest proporcjonalna do tej siły i odwrotnie proporcjonalna do masy ciała. Taki słowny opis jest poprawny i nie musiałem koniecznie wypisywać mego równania. Stwierdzenie to ma jednak charakter matematyczny i można się zastanawiać, jak może ono stanowić podstawowe prawo. Co robi planeta? Czy spogląda na Słońce, ocenia odległość i za pomocą wewnętrznego komputera oblicza odwrotność kwadratu odległości, aby wiedzieć, jak ma zmienić prędkość? To z pewnością nie jest właściwe wyjaśnienie mechanizmu działania grawitacji! Wielu uczonych usiłowało pójść dalej. Ktoś zagadnął Newtona o jego teorię: "Przecież to nic nie znaczy, niczego nam nie mówi". "Prawo powszechnego ciężenia mówi, jak porusza się planeta - odpowiedział Newton. - To powinno wystarczyć. Powiedziałem, jak się porusza, a nie dlaczego". Ludzie są jednak często niezadowoleni, gdy nie znają mechanizmu działania pewnego zjawiska. Chciałbym teraz przedstawić pewną teorię, wymyśloną w celu wyjaśnienia działania grawitacji. Według niej przyciąganie grawitacyjne jest konsekwencją dużej liczby różnych zdarzeń, co tłumaczy, dlaczego należy je opisywać za pomocą matematyki. Przypuśćmy, że cały świat jest wypełniony bardzo szybko poruszającymi się cząstkami. Cząstki nadlatują ze wszystkich kierunków i od czasu do czasu uderzają w Ziemię. Ziemia

## 42 Charakter praw fizycznych

### Ryc. 2.1

i Słońce są niemal przezroczyste dla tych cząstek - niemal, ale nie całkowicie. Czasami, gdy cząstka przelatuje przez Ziemię lub Słońce, dochodzi do zderzenia. Spójrzmy teraz, co się dzieje (ryc. 2.1).

S to Słońce, Z zaś to Ziemia. Gdyby nie było Słońca, cząstki bombardowałyby Ziemię ze wszystkich stron, przy każdym uderzeniu lekko ją popychając. To nie wpłynęłoby jednak na ruch Ziemi, ponieważ cząstki nadlatują równie często z prawej strony i z lewej, z góry i z dołu. Gdy jednak w pobliżu znajduje się Słońce, cząstki nadlatujące z tego kierunku są częściowo pochłaniane przez Słońce, gdyż w wyniku zderzeń nie mogą się przez nie przedostać. Cząstki mają do pokonania przeszkodę, Słońce, a zatem od strony Słońca uderza w Ziemię mniej cząstek. Łatwo się przekonać, że im większa odległość do Słońca, tym mniej cząstek lecących w kierunku Ziemi napotyka na swojej drodze Słońce. Słońce wydaje się mniejsze - w istocie kątem bryłowy, jaki tworzy tarcza Słońca, jest odwrotnie proporcjonalny do kwadratu odległości. Wobec tego pojawia się siła popychająca Ziemię ku Słońcu, odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości. Siła ta jest konsekwencją dużej liczby bardzo prostych operacji, po prostu zderzeń z nadlatującymi cząstkami. Teraz matematyczna zależność siły od odległości wydaje się mniej zaskakująca, ponieważ działanie siły sprowadza się do znacznie prostszej podstawowej operacji niż obliczanie odwrotności kwadratu odległości. Ten schemat, z odbijającymi się cząstkami, zastępuje obliczenia.

## Związek między matematyką i fizyką 43

1

Cały ten schemat jest jednak błędny z innych powodów. Zawsze należy zbadać wszystkie konsekwencje nowej teorii, aby się przekonać, czy wynikają z niej jakieś nowe przewidywania. Wspomniana teoria rzeczywiście prowadzi do pewnych nowych wniosków. Skoro Ziemia się porusza, to cząstki czę-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
ściej uderzają w nią z przodu niż z tyłu. (Gdy ktoś biegnie podczas deszczu, krople uderzają częściej w twarz niż w tył głowy, ponieważ człowiek biegnie im na spotkanie). Jeśli Ziemia się porusza, to leci na spotkanie z cząstkami nadlatującymi z przodu i ucieka przed cząstkami nadlatującymi z tyłu. Wobec tego częściej dochodzi do zderzeń z cząstkami bombardującymi Ziemię z przodu i musi pojawić się siła hamująca ruch. Siła ta spowodowałaby zmniejszenie prędkości orbitalnej Ziemi. W takim przypadku Ziemia z pewnością nie mogłaby krążyć po orbicie przez trzy czy cztery miliardy lat, a wiemy, że krąży co najmniej tak długo. To koniec teorii cząstek. "Dobrze - ktoś mógłby powiedzieć. - Ale to był niezły pomysł i przynajmniej na chwilę udało nam się pozbyć matematyki. Czy uda się wymyślić coś lepszego?" Być może tak, nikt nie może z góry powiedzieć, że to niemożliwe. Jednak od czasów Newtona do dzisiaj nikomu nie udało się wymyślić lepszego teoretycznego wyjaśnienia matematycznego formalizmu teorii ciężenia, które nie byłoby powtórzeniem tego, co już wiemy, nie spowodowałoby matematycznych komplikacji i nie prowadziło do błędnych przewidywań. Nie mamy zatem modelu grawitacji, a wciąż tylko matematyczną teorię. Gdyby dotyczyło to tylko tego jednego prawa, mielibyśmy do czynienia z interesującą, czy też irytującą sytuacją. Okazuje się jednak, że gdy dłużej i głębiej badamy naturę, gdy odkrywamy kolejne prawa, znajdujemy kolejne przypadki tej samej choroby. Wszystkie nasze prawa to abstrakcyjne stwierdzenia, wymagające znajomości trudnej i skomplikowanej matematyki. Prawo powszechnego ciężenia ma stosunkowo prostą postać matematyczną. Im dalej idziemy, tym bardziej złożony staje się matematyczny formalizm. Dlaczego? Nie mam zielonego pojęcia. Chcę tylko powiedzieć, że tak właśnie się dzieje. W tym wykładzie chcę podkreślić, że jest rzeczą niemożliwą

#### 44 Charakter praw fizycznych

porządne zrozumienie piękna praw natury, gdy nie zna się matematyki, i to na dość wysokim poziomie. Przykro mi, ale tak już jest.

W odpowiedzi moglibyście powiedzieć coś takiego. "Dobrze, skoro nie ma żadnego wyjaśnienia tego czy owego prawa, proszę mi przynajmniej powiedzieć, jakie jest to prawo. Dlaczego mi pan tego nie powie, używając słów zamiast symboli? Matematyka to tylko pewien język i chcę umieć go przetłumaczyć". To mogę zrobić, choć wymaga to cierpliwości. W rzeczywistości wydaje mi się, że objaśniając zasadę grawitacji, częściowo już to zrobiłem. Mógłbym jeszcze wyjaśnić bardziej szczegółowo, że jeśli odległość wzrasta dwukrotnie, to siła maleje czterokrotnie i tak dalej. Mógłbym zastąpić abstrakcyjne symbole słowami. Innymi słowy, mógłbym być uprzejmy dla wszystkich laików, którzy siedzą i czekają, mając nadzieję, że coś im wyjaśnię. Autorzy cieszą się różną reputacją ze względu na zręczność, z jaką potrafią wytłumaczyć laikom różne trudne sprawy, posługując się ich językiem. Laik przegląda książkę za książką w nadziei, że uda mu się jakoś uniknąć skomplikowanych rozważań, które tak czy owak pojawiają się w dziełach nawet najlepszych popularyzatorów tego rodzaju. W miarę czytania laik czuje się coraz bardziej zagubiony, natyka się na kolejne skomplikowane stwierdzenia, czegoś nie rozumie, potem jeszcze czegoś i nic już nie trzyma się kupy. Wywody autora stają się zupełnie niezrozumiałe i czytelnikowi pozostaje nadzieja, że w innej książce znajdzie lepsze wyjaśnienie... Temu autorowi niemal się udało, może innemu powiedzie się jeszcze lepiej.

Moim zdaniem całkowita eliminacja matematyki jest niemożliwa, ponieważ matematyka nie jest językiem jak inne. Matematyka to język plus rozumowanie; język i logika. Matematyka jest narzędziem służącym do rozumowania. W istocie matematyka jest wielkim zbiorem wyników czyjegoś rozumowania

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
 wania. Dzięki matematyce można powiązać ze sobą różne stwierdzenia. Na przykład mogę powiedzieć, że siła jest skierowana ku Słońcu. Mogę również powiedzieć, tak jak to zresztą zrobiłem, że planeta porusza się w taki sposób, iż jeśli narysu-

Związek między matematyką i fizyką 45

je linię łączącą Słońce z planetą, po czym narysuję następną linię po upływie określonego czasu, powiedzmy trzech tygodni, to pole powierzchni zamkniętej między tymi liniami jest takie samo jak między kolejnymi liniami po upływie następnych trzech tygodni, i jeszcze następnych, i tak dalej, w miarę jak planeta podąża wokół Słońca. Mogę starannie wyjaśnić oba te stwierdzenia, ale nie potrafię wytłumaczyć, dlaczego są one równoważne. Natura jest na pozór bardzo skomplikowana, ale wszystkie jej dziwne prawa i reguły, które laikom trzeba wyjaśniać oddzielnie, są w istocie ze sobą powiązane. Jeśli ktoś nie zna matematyki, nie będzie w stanie dostrzec w gąszczu faktów zasad logicznych, prowadzących od jednego do drugiego. Trudno zapewne uwierzyć, że jeśli siła jest skierowana w stronę Słońca, to promień wodzący planety w równych odstępach czasu zakreśla równe pola. Wobec tego pozwolę sobie udowodnić, że te dwa stwierdzenia są równoważne. Dzięki temu wszyscy być może lepiej je zrozumieją. Wykażę, że te dwa stwierdzenia są ze sobą powiązane w taki sposób, iż za pomocą reguły wnioskowania można przejść od jednego do drugiego, matematyka zaś to po prostu uporządkowany system rozumowania. W ten sposób wszyscy będą mogli docenić piękny związek między wspomnianymi stwierdzeniami. Udowodnię zatem, że jeśli siła jest skierowana do Słońca, to w równych odstępach czasu promień planety zakreśla zawsze takie samo pole.

'»» f^ ftANETBk  
 7t < •  
 ^/spotna ^ysckpśc  
 •boJIA  
 Ryc. 2.2

#### 46 Charakter praw fizycznych

Ryc. 2.3

Zaczynam od Słońca i planety (ryc. 2.2). Wyobraźmy sobie, że w pewnej chwili planeta znajduje się w punkcie 1 i porusza się z taką prędkością, iż po jednej sekundzie znajdzie się w punkcie 2. Gdyby Słońce nie przyciągało planety, to zgodnie z zasadą bezwładności Galileusza poruszałaby się ona dalej po linii prostej ze stałą prędkością. Wtedy w ciągu kolejnej sekundy planeta pokonałaby dokładnie taką samą odległość wzdłuż linii prostej i znalazłaby się w punkcie 3. Najpierw wykażemy, że jeśli na planetę nie działa żadna siła, to w równych odstępach czasu linia łącząca Słońce z planetą zakreśla równe pola. Przypominam, że pole trójkąta jest równe połowie iloczynu długości podstawy i wysokości, wysokość zaś to odległość od wierzchołka do podstawy. W trójkącie szerokokątnym (ryc. 2.3) wysokość to odcinek AD, podstawą zaś jest odcinek BC. Porównajmy teraz pola zakreślone przez promień wodzący przy założeniu, że Słońce nie wywiera żadnej siły na planetę (ryc. 2.2).

Jak pamiętamy, w tym przypadku odcinki 1-2 i 2-3 mają jednakową długość. Pytanie, czy równe są również pola obu trójkątów? Rozważmy trójkąt utworzony przez Słońce oraz punkty 1 i 2. Jakie jest pole tego trójkąta? Pole jest równe połowie iloczynu podstawy 1-2 i wysokości od podstawy do Słońca. A jakie jest pole drugiego trójkąta, utworzonego przez

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
 Słońce i punkty 2 i 3? Jego pole to połowa iloczynu podstawy 2-3 i wysokości. Oba trójkąty mają wspólną wysokość i, jak już powiedziałem, takie same podstawy, a zatem ich pola są jednakowe. Dobrze. Wykazaliśmy, że jeśli na planetę nie działa żadna siła, to w równych odstępach czasu promień wodzący zakreśla równe pola. Jednak w rzeczywistości Słońce przyciąga

Związek między matematyką i fizyką 47

Ryc. 2.4

w czasie 1-2-3 Słońce przyciąga planetę i powoduje zmianę kierunku ruchu. By uzyskać dobre przybliżenie, przyjmujemy za punkt odniesienia punkt 2, czyli średnie położenie planety, i następnie założymy, że wskutek działania siły nastąpiła pewna zmiana prędkości w kierunku linii łączącej planetę ze Słońcem, czyli 2-S (ryc. 2.4). Planeta poruszała się wzdłuż linii 1-2. Gdyby nie działała żadna siła, w ciągu następnej sekundy poruszałaby się dalej po prostej i znalazłaby się w punkcie 3. Jednak z powodu działającej siły jej prędkość zmieniła się o pewną prędkość skierowaną równoległe do linii 2-S. Prędkość planety jest zatem sumą prędkości, z jaką planeta chciała się poruszać, i zmiany prędkości spowodowanej przez przyciąganie Słońca. Wobec tego po upływie kolejnej sekundy planeta nie znajdzie się w punkcie 3, lecz raczej w punkcie 4. Teraz chcemy porównać pola trójkątów 23S i 24S. Twierdzę, że mają one jednakowe pole. Trójkąty te mają wspólną podstawę 2-S. Czy mają jednakową wysokość? Tak, oczywiście, ponieważ leżą między dwiema liniami równoległymi. Punkt 4 leży w takiej samej odległości od linii 2-S jak punkt 3. Wobec tego trójkąty 23S i 24S mają jednakowe pola. wcześniej wykazałem, że trójkąt 12S ma takie samo pole jak trójkąt 23S. A zatem wiemy już, że 12S = 24S. Wobec tego podczas rzeczywistego ruchu po orbicie promień wodzący planety zakreśla takie samo pole w pierwszej sekundzie, jak w drugiej. Podany dowód ukazuje związek między

48 Charakter praw fizycznych

tym stwierdzeniem a faktem, że siła jest skierowana ku Słońcu. Czy ten dowód nie jest pomysłowy? Zapożyczyłem go wprost od Newtona. Wziąłem go z jego traktatu Principia, razem z rysunkiem. Użyłem tylko innych oznaczeń, ponieważ Newton pisał po łacinie, a ja używam cyfr arabskich. W swoim dziele Newton wszystkiego dowodził na sposób geometryczny. Dziś nie rozumiemy w taki sposób. Zamiast tego stosujemy symboliczne metody analityczne. Narysowanie odpowiednich trójkątów i wykazanie, że mają jednakowe pola, wymaga pomysłowości. Dzięki ulepszeniu metod analizy możemy łatwiej i szybciej rozwiązywać takie problemy. Chciałbym teraz pokazać, jak wygląda dowód powyższego twierdzenia, gdy posługujemy się nowoczesnymi metodami matematycznymi. Teraz nic nie rysujemy, a tylko wypisujemy mnóstwo symboli.

Chcemy wykazać pewne twierdzenie o szybkości zmian pola. Oznaczmy szybkość jako  $A$ . Pole zmienia się, gdy zmienia się kierunek promienia wodzącego. Prędkość zmiany pola jest równa iloczynowi promienia i składowej prędkości planety prostopadłej do promienia. Zapisujemy to w postaci:

$\Delta$

$r$

$A \cdot$

$\times r$

Teraz chcemy sprawdzić, czy prędkość zmiany pola jest stała, czy też ulega zmianom. Zgodnie z drugim prawem Keplera, prędkość zmiany pola jest stała. Wobec tego musimy obliczyć pochodną  $A$ , co polega na wykorzystaniu pewnych

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
sztuczek, aby umieścić kolejne kropki we właściwych miejscach. I to wszystko. Tych sztuczek trzeba się nauczyć; chodzi tu o zbiór kilku reguł, które okazały się niezwykle użyteczne w takich rachunkach. Piszemy:

$\hat{A}$   
 $r \times r$   
 $A \cdot A$   
 $+ r < r$

Pierwszy wyraz oznacza, że mamy wziąć składową prędkości w kierunku prostopadłym do prędkości. Rzecz jasna, ta składowa znika. Przyspieszenie jest równe pochodnej prędko-

Związek między matematyką i fizyką 49

ści, czyli drugiej pochodnej  $r$ , którą zapisujemy w postaci  $r$  z dwiema kropkami. Druga zasada dynamiki Newtona stwierdza, że przyspieszenie jest równe sile podzielonej przez masę.

Zgodnie z ostatnią równością, prędkość zmian prędkości zmian pola jest proporcjonalna do składowej siły prostopadłej względem promienia. Lecz jeśli siła jest skierowana wzdłuż promienia, to - jak twierdził Newton - składowa ta znika, a zatem  $t \ll \lambda, = 0$  lub  $a \gg 0$

Równanie to oznacza, że prędkość zmian pola jest stała. Przykład ten ilustruje, jak potęgą analizy zależy od stosowanej notacji. Newton znalazł takie metody (choć stosował nieco inną notację), ale w swoim dziele przedstawił wszystkie dowody w postaci geometrycznej. Chciał bowiem umożliwić laikom zrozumienie toku swej myśli. Newton sam wymyślił rachunek różniczkowy, to znaczy takie metody matematyczne, jakie przed chwilą pokazałem.

Przykład ten jest dobrą ilustracją związku między matematyką i fizyką. Gdy problemy fizyczne stają się zbyt trudne, często szukamy pomocy u matematyków, którzy mogli już zbadać analogiczne zagadnienia i przygotować dla nas metody rozumowania. Jeśli nie, musimy sami opracować odpowiednie metody i nauczyć ich matematyków. Każdy, kto ściśle rozumuje na dowolny temat, przyczynia się do rozwoju wiedzy o tym, co się dzieje, gdy o czymś myślimy. Jeśli nada temu abstrakcyjną postać i pošle na jakiś wydział Matematyki, jego wyniki mogą się znaleźć w książkach jako nowa dziedzina matematyki. Matematyka to sposób przechodzenia od jednego zbioru stwierdzeń do drugiego. Rzecz jasna, matematyka bardzo przydaje się w fizyce, ponieważ istnieje wiele sposobów opisywania zjawisk, a matematyka pozwala nam badać ich konsekwencje, analizować problemy i zmieniać prawa, tak aby powiązane ze sobą zostały pozornie różne stwierdzenia. W rzeczywistości fizycy wiedzą bardzo niewiele. Fizykowi w zupełności wystarcza, jeśli pamięta reguły rozu-

50 Charakter praw fizycznych

mowania, ponieważ różne stwierdzenia na temat równych czasów, sił skierowanych wzdłuż promienia i tak dalej, są ze sobą logicznie powiązane.

Teraz nasuwa się interesujące pytanie. Czy istnieje jakiś punkt, od którego należałoby rozpocząć, aby wydedukować wszystkie prawa? Czy istnieje jakaś naturalna struktura lub hierarchiczny porządek pozwalający na stwierdzenie, że pewien zbiór praw jest bardziej fundamentalny niż inny i że można z niego wyprowadzić więcej wniosków? Istnieją dwa sposoby uprawiania matematyki, które będę tu określał jako 'babiloński i grecki'. W babilońskich szkołach matematyki uczniowie rozwiązywali bardzo wiele przykładów, dopóki nie uchwycili ogólnej reguły. Uczono również wielu faktów geometrycznych, własności kół, twierdzenia Pitagorasa, wzorów do obliczania pola trójkąta i objętości sześcianu. Uczniowie opanowywali również pewne sposoby rozumowania, pozwala-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
jącej przejść od jednego twierdzenia do innego. Istniały tablice numeryczne, dzięki którym babilońscy matematycy potrafili rozwiązywać różne skomplikowane równania. Celem matematyki było rozwiązywanie problemów obliczeniowych. Natomiast Euklides odkrył, że istnieje sposób wyprowadzania wszystkich twierdzeń geometrycznych z pewnego zbioru aksjomatów, czyli twierdzeń szczególnie prostych i oczywistych. Babilońscy matematycy znali bardzo wiele różnych twierdzeń i związków między nimi, ale nigdy w pełni nie uzmysłowili sobie, że można je otrzymać z kilku aksjomatów. Niemal cała nowoczesna matematyka opiera się na aksjomatach i dowodach, przy czym obowiązują bardzo wyraźne reguły określające, jakie stwierdzenia można uznać za aksjomaty. W nowoczesnej geometrii przyjmujemy aksjomaty podobne do aksjomatów Euklidesa, choć nieco ulepszone; z nich to wyprowadzamy wszystkie twierdzenia. Na przykład twierdzenie Pitagorasa (że suma kwadratów przyprostokątnych trójkąta prostokątnego jest równa kwadratowi przeciwprostokątnej) raczej nie powinno być uznane za aksjomat geometrii Euklidesa, choć zgodnie z inną koncepcją geometrii, którą zaproponował Kartezjusz, twierdzenie to jest uważane za pewnik.

#### Związek między matematyką i fizyką 51

Należy zatem pogodzić się z faktem, że nawet w matematyce można przyjąć różne punkty wyjścia. Jeśli różne twierdzenia są logicznie równoważne, to nie można w żaden sposób powiedzieć, które są bardziej fundamentalne i powinny być uznane za aksjomaty, ponieważ jeśli wybralibyśmy odmienne aksjomaty, moglibyśmy rozumować w przeciwnym kierunku. Przypomina to kratownicę mostu z wieloma belkami; jeśli którejś wypadną, zawsze można wstawić nowe w innym układzie. Zgodnie z obowiązującą obecnie matematyczną tradycją należy rozpoczynać od takich stwierdzeń, które uznawane są konwencjonalnie za aksjomaty, i następnie budować dalszą logiczną strukturę. Natomiast babilońską koncepcję matematyki można wyrazić następująco: "Tak się złożyło, że wiem to i to, a nawet jeszcze i to, co już wystarczy, żeby wyprowadzić wszystkie inne twierdzenia. Jutro mogę zapomnieć jedną z tych zasad podstawowych, ale będę pamiętał inne, które są również prawdziwe, więc będę mógł zrekonstruować wszystkie twierdzenia. Nigdy nie jestem pewny, od czego powinienem zaczynać i na czym skończyć. Po prostu zawsze pamiętam dostatecznie dużo twierdzeń, aby każdego dnia, gdy zawiedzie mnie pamięć i zapomnę jakąś zasadę, móc zrekonstruować całą wiedzę".

Metoda polegająca na tym, by zawsze zaczynać od aksjomatów, nie pozwala na sprawne dowodzenie twierdzeń. Gdy chcemy dowieść pewnych twierdzeń geometrycznych, na ogół nie cofamy się aż do aksjomatów, lecz posługujemy się szybszymi metodami. Jeśli pamiętamy kilka twierdzeń geometrycznych, możemy wyprowadzić wszystkie pozostałe, ale zwykle można to zrobić znacznie szybciej w inny sposób. Przyjęcie najlepszego zbioru aksjomatów nie zawsze okazuje się najlepszym sposobem na znalezienie drogi. W fizyce potrzebna jest metoda babilońska, a nie grecka. Chciałbym wyjaśnić dlaczego. Problem z metodą Euklidesa polega na tym, że aksjomaty powinny być w jakiś sposób szczególnie ważne lub interesujące. W przypadku grawitacji na przykład możemy zapytać: co jest rzeczą ważniejszą, bardziej podstawową, co jest lepszym aksjomatem, czy stwierdzenie, że siła jest skierowana ku słoń-

#### 52 Charakter praw fizycznych

cu, czy że promień wodzący w równych odstępach czasu zakreśla jednakowe pola? Z pewnego punktu widzenia ważniejsze jest stwierdzenie mówiące o sile. Gdy wiadomo, jakie działają siły, można rozpatrywać zachowanie układu wielu ciał,



Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)

które nie poruszają się po elipsach. W tym przypadku twierdzenie o polu nie obowiązuje. Z tego powodu uważam, że twierdzenie o sile byłoby lepszym aksjomatem. Z drugiej strony, twierdzenie o polu można uogólnić, tak aby obowiązywało również w przypadku układu wielu ciał. Nowe stwierdzenie jest bardziej skomplikowane i nie tak ładne, ale wywodzi się niewątpliwie z twierdzenia o równych polach. Weźmy układ składający się z wielu ciał, na przykład Jowisza, Saturna, Słońca i licznych gwiazd. Przyjmujemy, że wszystkie te ciała niebieskie oddziałują między sobą grawitacyjnie. Popatrzmy na ten układ z dużej odległości. Widzimy wtedy jakby rzut układu na płaszczyznę prostopadłą do linii obserwacji (ryc. 2.5). Ciała poruszają się w rozmaitych kierunkach. Wybieramy dowolny punkt i obliczamy pole, jakie zakreślają promienie wodzące poprowadzone do wszystkich ciał. Sumujemy pola, przy czym pole obliczone dla danego ciała mnożymy przez jego masę, tak że ciała o większej masie dają większy wkład do sumy. Jeśli więc jedno ciało ma dwa razy większą masę niż drugie, to pole zakreślone przez jego promień wodzący liczy się podwójnie. Otrzymana w ten sposób suma pól "ważonych" masami nie zależy od czasu. Suma ta stanowi tak zwany całkowity moment pędu układu, a przywołane twierdzenie to zasada zachowania momentu pędu. Zachowanie wielkości oznacza, że badana wielkość się nie zmienia.

0- $\wedge$   
1 /  
 $\wedge$  \*1  
v

Ryc. 2.5

Związek między matematyką i fizyką 53

Z zasady zachowania momentu pędu wynika między innymi następujący fakt. Proszę sobie wyobrazić, że bardzo liczne gwiazdy zbliżają się do siebie, aby utworzyć mgławicę, czy też galaktykę. Początkowo poruszają się powoli i są bardzo daleko od siebie, a zatem ich promienie wodzące są bardzo długie. Ruch gwiazd powoduje, że promienie zakreślają pewne pole. W miarę jak gwiazdy zbliżają się do siebie, promienie wodzące stale maleją. Teraz, żeby w ciągu każdej sekundy promienie wodzące zakreślały takie samo pole, gwiazdy muszą się poruszać znacznie prężej. Widzimy zatem, że w miarę formowania się mgławicy gwiazdy muszą krażyć z coraz większą prędkością, co pozwala jakościowo zrozumieć kształt mgławic spiralnych. Ta sama zasada zachowania tłumaczy, w jaki sposób łyżwiarz może wykonać piruet. łyżwiarz zaczyna wirować z daleko wychyloną nogą i rozłożonymi ramionami. W każdej sekundzie noga i ramiona zakreślają pewne pole. Następnie łyżwiarz przyciąga ramiona do tułowia i opuszcza nogę. Teraz musi wirować znacznie prężej, by powierzchnia zakreślona przez jego kończyny w czasie jednej sekundy była taka sama jak poprzednio. Nie udowodniłem tego w przypadku łyżwiarza, który korzysta z siły mięśni, a nie grawitacji, ale to prawda. Teraz musimy rozważyć następujący problem. Często się zdarza, że wychodząc z pewnego prawa fizycznego, na przykład prawa powszechnego ciężenia, dochodzimy do zasady, która jest znacznie bardziej ogólna i ma większe znaczenie, niż wskazuje na to wyprowadzenie. W matematyce to się nie zdarza; twierdzenia matematyczne nie pojawiają się nagle w nieoczekiwanym kontekście. Inaczej mówiąc, gdybyśmy przyjęli jako jeden z postulatów prawo równych pól dla grawitacji, moglibyśmy wyprowadzić zasadę zachowania momentu pędu, ale tylko dla grawitacji. Z doświadczeń wynika jednak, że zasada ta ma znacznie szerszy zakres ważności. Newton przyjął inne postulaty, które pozwalają na wyprowadzenie znacznie ogólniejszej zasady zachowania momentu pędu. Jednak przypuszczenia Newtona były błędne. Nie istnieją siły, cząstki nie poruszają się po orbitach, to wszystko lipa. Natomiast zasada

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
zachowania momentu pędu, którą otrzymaliśmy z twierdzenia

#### 54 Charakter praw fizycznych

o stałych polach, jest słuszna. Zasada zachowania momentu pędu jest ściśle spełniona w mechanice kwantowej, rządzącej ruchem atomów. Mamy zatem ogólne zasady, które dotyczą różnych praw; jeśli jednak potraktujemy ich wyprowadzenie zbyt poważnie i uznamy, że dana zasada obowiązuje tylko dlatego, iż obowiązuje jakieś bardziej szczegółowe prawo, to nie zrozumiemy związków między różnymi działami fizyki. Pewnego dnia, gdy fizyka będzie już skończona i będziemy znali wszystkie prawa, będziemy mogli wybrać odpowiednie aksjomaty i niewątpliwie ktoś znajdzie taki ich zbiór, który pozwoli udowodnić pozostałe prawa. Dopóki jednak nie mamy kompletu praw, możemy tylko się domyślać, które mają szerszy zakres ważności, niż wskazuje na to ich dowód. Aby rozumieć fizykę, musimy dążyć do równowagi i starać się pamiętać o wielu różnych twierdzeniach naraz i o związkach między nimi, ponieważ prawa mają często szerszy zakres ważności, niż to wynika ze sposobu ich wyprowadzenia. Fakt ten nie będzie miał znaczenia dopiero wtedy, gdy poznamy wszystkie prawa. Kolejny bardzo dziwny i interesujący aspekt związku między matematyką i fizyką to fakt, że posługując się argumentami matematycznymi, można otrzymać ten sam wynik, wychodząc z zupełnie różnych założeń. To właściwie dość oczywiste. Jeśli mamy aksjomaty, możemy zamiast nich przyjmując inne twierdzenia logicznie równoważne. W rzeczywistości jednak prawa fizyczne mają tak subtelną strukturę, że różne, choćby formalnie równoważne sformułowania, mają odmienny charakter jakościowy, przez co są właśnie tak interesujące. Aby zilustrować, o co mi chodzi, przedstawię teraz prawo powszechnego ciężenia w trzech różnych postaciach, które są ściśle równoważne, jakkolwiek wydają się zupełnie odmienne.

Zgodnie z pierwszym sformułowaniem wszystkie ciała przyciągają się wzajemnie, przy czym siła przyciągania jest zgodna ze wzorem, który podałem już wcześniej.

CSJSAS,  
'r\*

#### Związek między matematyką i fizyką 55

Każde ciało, na które działa siła, przyspiesza, czyli zmienia prędkość o pewną wielkość na sekundę. To najbardziej znane sformułowanie prawa powszechnego ciężenia Newtona. Wynika z niego, że siła działająca na ciało zależy od czegoś, co dzieje się w skończonej odległości. Jak przyjęło się mówić, prawo powszechnego ciężenia ma charakter nielokalny. Siła działająca na ciało zależy od położenia innego ciała w pewnej odległości.

Idea oddziaływania na odległość może budzić wątpliwości. W jaki sposób dane ciało wie, co się dzieje gdzieś daleko? Istnieje inny, bardzo dziwny sposób formułowania praw, za pomocą pojęcia pola. To dość trudno wyjaśnić, ale chciałbym powiedzieć, o co z grubsza chodzi. Teraz prawo ciężenia wygląda zupełnie inaczej. W każdym punkcie przestrzeni mamy pewną liczbę (to liczba, a nie mechanizm - kłopot z fizyką polega na tym, że musi mieć postać matematyczną). Gdy poruszamy się w przestrzeni, widzimy, że liczby się zmieniają. Gdy teraz umieścimy w przestrzeni pewne ciało, działa na nie siła skierowana w tę stronę, w którą liczby zmieniają się najszybciej. (Będę się posługiwał terminem "potencjał", czyli powszechnie przyjętą nazwą pola. Siła jest skierowana w tym kierunku, w którym potencjał zmienia się najszybciej). Ponadto siła jest proporcjonalna do szybkości zmian potencjału. To dopiero część pełnego sformułowania, ponieważ jeszcze nie powiedziałem, jak określić zmiany potencjału. Mógłbym powie-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
dzieć, że potencjał jest odwrotnie proporcjonalny do odległości od ciała będącego jego źródłem, ale w ten sposób wrócilibyśmy do idei oddziaływania na odległość. Prawo to można jednak sformułować w inny sposób, wymagający tylko znajomości potencjału w małej kuli wokół danego ciała. Jeśli chcemy znać potencjał w środku kuli, wystarczy znać wartość potencjału na jej powierzchni, przy czym kula może mieć dowolnie mały promień. Nie trzeba patrzeć gdzieś daleko, wystarczy wiedzieć, jak wygląda potencjał w najbliższym otoczeniu i znać masę zawartą w kuli. Potencjał wyznacza się zgodnie z następującą regułą. Potencjał w środku kuli jest równy średniemu potencjałowi na jej powierzchni minus ta sama

#### 56 Charakter praw fizycznych

stałą  $G$ , którą widzieliśmy w poprzednim równaniu, pomnożona przez masę zawartą w kuli i podzielona przez podwojony promień (promień oznaczam literą  $a$ ). Reguła ta daje właściwy wynik, jeśli promień kuli jest dostatecznie mały.

Potencjał w środku = Średni potencjał na powierzchni -  $G(\text{masa wewnątrz kuli})/2a$

Widzimy, że to prawo różni się od poprzedniego sformułowania, ponieważ teraz potencjał w danym punkcie jest określony przez potencjał w bezpośrednim otoczeniu. Prawo Newtona mówi, co się stanie w danej chwili, na podstawie informacji o tym, co działo się w chwili poprzedniej. W ten sposób możemy śledzić zachowanie układu chwila po chwili. Lecz prawo Newtona wymaga wielkich skoków w przestrzeni. Alternatywne sformułowanie jest lokalne zarówno w czasie, jak i w przestrzeni, ponieważ potencjał w danym punkcie zależy tylko od potencjału w punktach sąsiednich. Jednak matematycznie oba sformułowania są w pełni równoważne.

Istnieje jeszcze jedno sformułowanie prawa ciężenia, radykalnie odmienne pod względem filozofii i koncepcji jakościowych. Jeśli ktoś nie lubi oddziaływania na odległość, to już pokazałem, jak może go uniknąć. Teraz chciałbym przedstawić sformułowanie, które filozoficznie jest skrajnym przeciwieństwem idei lokalnego potencjału. Tym razem w ogóle nie zajmujemy się tym, co się dzieje od punktu do punktu, lecz rozważymy pewne ogólne stwierdzenie dotyczące całej trajektorii. Gdy mamy wiele cząstek i chcemy wiedzieć, jak porusza się jedna z nich, musimy rozważyć wszystkie możliwe drogi, po których cząstka ta może się przedostać od punktu początkowego do końcowego w danym czasie (ryc. 2.6). Powiedzmy, że cząstka ma się przedostać od punktu  $X$  do  $Y$  w ciągu godziny. Chcemy obliczyć, po jakiej drodze ma się poruszać. Rozważamy wszystkie możliwe krzywe i dla każdej obliczamy pewną wielkość. (Nie chcę tłumaczyć, co to za wielkość. Tych, którzy otarli się o te pojęcia, poinformuję jednak, że chodzi o różnicę energii kinetycznej i potencjalnej cząstki, uśrednioną wzdłuż

Związek między matematyką i fizyką 57

X

#### Ryc. 2.6

drogi). Okazuje się, że dla każdej drogi otrzymamy inny wynik. Dla jednej drogi wielkość ta jest minimalna i w rzeczywistości cząstka porusza się właśnie po tej drodze! Teraz opisujemy rzeczywistą drogę cząstki, czyli elipsę, przyjmując pewne twierdzenie o całej krzywej. Straciliśmy ideę przyczynowości, zgodnie z którą cząstka czuje siłę i porusza się z przyspieszeniem określonym przez tę siłę. Zamiast tego cząstka w jakiś sposób "wywachuje" wszystkie krzywe, "rozważa" wszystkie możliwości, po czym "wybiera" odpowiednią (tę, dla której nasza wielkość ma minimalną wartość).

Przekonaliśmy się, że naturę można opisywać na wiele

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
pięknych sposobów. Gdy ktoś twierdzi, że natura zachowuje się w sposób przyczynowy, może użyć prawa powszechnego ciężenia Newtona. Gdy komuś zależy, by opisywać naturę za pomocą zasad wariacyjnych, może skorzystać z naszego ostatniego sformułowania. Jeśli ktoś twierdzi, że musi istnieć lokalne pole, prawo grawitacji można sformułować zgodnie z tym twierdzeniem. Które z powyższych sformułowań jest poprawne? Jeśli nie byłyby one całkowicie równoważne matematycznie, jeśli jedno prowadziło do innych konsekwencji niż pozostałe, to wystarczyłoby wykonać eksperyment i sprawdzić, które sformułowania wybrała natura. Ludzie prowadzą często długie dyskusje filozoficzne na temat tego, która teoria jest lepsza, ale z doświadczenia wiadomo, że wszystkie idee filozoficzne na temat zachowania natury są na ogół błędne. Trzeba

58 Charakter praw fizycznych  
raczej zbadać różne możliwości. Jednak w naszym konkretnym przypadku podane trzy sformułowania rzeczywiście są równoważne. Wszystkie trzy sformułowania: prawo powszechnego ciężenia, koncepcja lokalnego pola i zasada wariacyjna, prowadzą do takich samych wniosków. Co mamy zatem zrobić? Jak można przeczytać w wielu książkach, nie możemy wybrać jednego sformułowania, kierując się względami naukowymi. To prawda. Z naukowego punktu widzenia stwierdzenia te są równoważne. Nie możemy podjąć żadnej decyzji, ponieważ nie istnieje żaden sposób, aby odróżnić eksperymentalnie te teorie, gdyż wszystkie prowadzą do takich samych przewidywań. Natomiast pod względem psychologicznym bardzo się od siebie różnią, i to pod dwoma względami. Po pierwsze, filozoficznie można je lubić lub nie, i na tę chorobę jedynym lekarstwem jest odpowiedni trening naukowy. Po drugie, są one różne psychologicznie, ponieważ prowadzą do zupełnie odmiennych konsekwencji, gdy próbujemy odgadnąć nowe prawa. Dopóki fizyka nie jest nauką "ukończoną" i wciąż usiłujemy odgadnąć nowe prawa, dopóty różne możliwe sformułowania mogą dawać odmienne wskazówki, co może się zdarzyć w innej sytuacji. Wobec tego psychologicznie takie różne sformułowania praw nie są bynajmniej równoważne, prowadzą bowiem do różnych hipotez na temat praw obowiązujących w szerszym kontekście. Na przykład Einstein zwrócił uwagę, że sygnały elektromagnetyczne nie mogą rozchodzić się z prędkością większą niż prędkość światła. Następnie odgadł, że ta zasada obowiązuje w odniesieniu do wszystkich sygnałów. (To taki sam proces odgadywania, z jakim mieliśmy do czynienia, rozszerzając zakres ważności zasady zachowania momentu pędu z jednego udowodnionego przypadku na wszystkie możliwe zjawiska). Einstein domyślił się, że ta zasada obowiązuje powszechnie i dotyczy również grawitacji. Jeśli sygnały nie mogą rozchodzić się prędzej niż światło, to koncepcja jakichkolwiek sił działających natychmiast na odległość jest błędna. Wobec tego w ogólnym sformułowaniu Einsteina metoda opisywania zjawisk zaproponowana przez Newtona

Związek między matematyką i fizyką 59  
jest zupełnie nieodpowiednia i potwornie skomplikowana, natomiast metoda wariacyjna i metoda lokalnego pola są proste i eleganckie. Jak dotychczas, nie rozstrzygnęliśmy jeszcze, która z nich jest lepsza. W rzeczywistości okazuje się, że w mechanice kwantowej żadne z tych sformułowań nie jest odpowiednie, przynajmniej w podanej przeze mnie wersji. Można natomiast pokazać, że zasada wariacyjna jest konsekwencją tego, że w małej skali cząstki zachowują się zgodnie z regułami mechaniki kwantowej. Najlepsze prawo, jakie obecnie znamy, stanowi pewne połączenie zasad wariacyjnych i koncepcji lokalnego pola.

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)

Uważamy, że prawa fizyczne mają charakter lokalny, ale można je sformułować w postaci zasad wariacyjnych. Nie jesteśmy jednak tego do końca pewni. Gdy mamy pewną teorię, częściowo słuszną, a częściowo błędną, i jeśli sformułujemy ją za pomocą odpowiednich aksjomatów, to może się okazać, że tylko jeden aksjomat jest błędny, a pozostałe są w porządku. W takim wypadku wystarczyłyby niewielkie zmiany. Jeśli wybralibyśmy inny zbiór aksjomatów, to mogłoby się okazać, że wszystkie są błędne, ponieważ wszystkie zależą od tej jednej błędnej koncepcji w naszej teorii. Nie jesteśmy w stanie z góry powiedzieć, bez pomocy intuicji, jak najlepiej sformułować konkretną teorię, by rozwiązywać nowe problemy. Dlatego zawsze musimy pamiętać o różnych, alternatywnych sformułowaniach. Właśnie z tego powodu fizycy muszą uprawiać matematykę zgodnie z tradycją babilońską i nie zwracać większej uwagi na precyzyjne wnioskowanie oparte na ustalonych aksjomatach.

Jedną z zadziwiających cech natury jest to, że dopuszcza bardzo wiele schematów interpretacyjnych. Jest to możliwe wyłącznie wskutek szczególnej struktury praw fizycznych. Na przykład to, że siła jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości, pozwala zastąpić ją koncepcją lokalnego pola. Gdyby siła była odwrotnie proporcjonalna do sześcienu odległości, nie można by tego zrobić w ten sam sposób. Z drugiej strony, dzięki temu, że siła jest proporcjonalna do przyspieszenia, czyli prędkości zmian prędkości, możemy zapisać prawo

#### 60 Charakter praw fizycznych

ruchu w postaci zasady wariacyjnej. Gdyby na przykład siła była proporcjonalna do prędkości, nie moglibyśmy zapisać prawa ruchu w takiej właśnie postaci. Jeśli poważnie zmienimy prawa fizyczne, przekonamy się, że można je zapisać na mniej sposobów. To zawsze było dla mnie wielką tajemnicą. Nie rozumiem, dlaczego poprawne prawa fizyczne można wyrazić na tak wiele sposobów. Wydaje się, że dobre prawa przechodzą przez kilka sit równocześnie.

Chciałbym jeszcze wspomnieć o paru ogólniejszych sprawach dotyczących związku między matematyką i fizyką. Matematycy zajmują się samą tylko strukturą wnioskowania i w zasadzie nie interesuje ich, o czym mówią. Nie muszą nawet wiedzieć, o czym mówią, ani - jak sami przyznają - czy to, co mówią, jest prawdą. Zaraz to wyjaśnię. Przyjmujemy na przykład pewne aksjomaty, mówiące to i to. Co dalej? Dalej można logicznie wnioskować, nawet jeśli się nie wie, co oznaczają słowa "to i to". Jeśli aksjomaty są precyzyjnie sformułowane i są dostatecznie kompletne, to pozostając w ramach tego języka, można wyprowadzać kolejne wnioski, nawet jeśli się nie rozumie znaczenia słów. Jeśli w aksjomacie znajduje się słowo trójkąt, to ktoś nie znający tego słowa i tak może wyprowadzić liczne twierdzenia o trójkącie. Ja natomiast mogę zapoznać się z jego rozumowaniem, potem powiedzieć, że "trójkąt to taka to a taka figura geometryczna z trzema bokami", i w ten sposób dowiaduję się nowych faktów, o których mówi jego twierdzenie. Innymi słowy, matematycy przygotowują abstrakcyjne rozumowania, które można wykorzystywać, o ile ma się zbiór aksjomatów mówiących coś o rzeczywistości. Natomiast wszystkie pojęcia używane przez fizyków mają określone znaczenie. To bardzo ważna sprawa, choć często nie doceniają jej ludzie, którzy w pierw zajmowali się matematyką, a potem przerwali się na fizykę. Fizyka to nie matematyka, a matematyka to nie fizyka. Jedna tylko pomaga drugiej. W fizyce musimy rozumieć związki między używanymi słowami a rzeczywistym światem. W końcu wszystkie uzyskane wyniki trzeba przecież przetłumaczyć na angielski, no i powiązać z zachowaniem rzeczywistych obiektów, urządzeń z miedzi i szkła, które

## Związek między matematyką i fizyką 61

służą do przeprowadzania eksperymentów. Dopiero wtedy możemy się przekonać, czy nasze przewidywania były prawdziwe. Ten problem w ogóle nie dotyczy matematyki.

Rzecz jasna, przygotowane teorie matematyczne bardzo się fizykom przydają. Zdarza się również, że to matematycy korzystają z koncepcji fizyków.

Matematycy lubią rozumować w sposób jak najbardziej ogólny. Gdy mówię do nich: "Chodzi mi o zwykłą, trójwymiarową przestrzeń", odpowiadają: "Jeśli mamy  $n$ -wymiarową przestrzeń, to obowiązują takie a takie twierdzenia". "Ale mnie interesuje tylko przypadek przestrzeni trójwymiarowej!" Na to oni: "To podstaw  $n=3$ ". Często okazuje się, że w takim przypadku różne skomplikowane twierdzenia bardzo się upraszczają. Fizyk z reguły interesuje się przypadkami szczególnymi, nie zaś twierdzeniami ogólnymi. Mówi zawsze o czymś konkretnym, nie prowadzi rozważań abstrakcyjnych o niczym. Fizyk chce mówić o sile ciężenia w przestrzeni trójwymiarowej, a nie o dowolnej sile w przestrzeni  $n$ -wymiarowej. Pewne uproszczenia są zatem konieczne, ponieważ matematycy przygotowali swoje teorie tak, aby pasowały do różnych zagadnień. To jest bardzo przydatne, i często się okazuje, że biedny fizyk wraca i mówi: "Przepraszam, czy mógłby mi pan jednak powiedzieć coś o przestrzeni czterowymiarowej..."

Gdy wiesz, o czym mówisz, to znaczy wiesz, że pewne symbole oznaczają siły, inne masy i tak dalej, wtedy możesz skorzystać z wielu zdroworozsądkowych przekonań o świecie. Widziałeś wiele rzeczy i wiesz mniej więcej, jak może zachodzić dane zjawisko. Natomiast biedny matematyk tłumaczy sobie wszystko na równania, a ponieważ symbole nie mają dla niego żadnego znaczenia, to nie ma innej rady, jak tylko szukać rozwiązania za pomocą ściśle, matematycznych reguł. Fizyk, który wie, jak mniej więcej powinno wyglądać rozwiązanie, może częściowo przynajmniej odgadnąć jego postać i szybko znaleźć odpowiedź. Ścisłość matematyczna nie jest szczególnie przydatna w fizyce. Nie należy jednak krytykować matematyków z tego powodu. To, że coś może okazać się przydatne dla fizyków, nie oznacza bynajmniej, że ma-

## 62 Charakter praw fizycznych

matematycy mają się tym zajmować. Matematycy robią swoje.

Jeśli chcesz czegoś innego, zrób to sam.

Kolejny problem, jaki należy rozważyć, to czy szukając nowych praw, powinniśmy się kierować zdroworozsądkowymi i filozoficznymi przekonaniem w rodzaju: "Nie lubię zasad wariacyjnych" i "Lubię zasady wariacyjne" albo "Nie lubię oddziaływania na odległość" i "Lubię oddziaływania na odległość". W jakiej mierze modele pomagają w poszukiwaniach?

Modele oczywiście bywają pomocne i większość wykładowców fizyki stara się nauczyć studentów, jak się nimi posługiwać i jak wyrobić sobie intuicyjne wyczucie przebiegu zjawisk. Nieodmiennie jednak okazuje się, że największe odkrycia wymagają odejścia od modelu, który okazuje się nieprzydatny. Gdy Maxwell tworzył elektrodynamikę, myślał o przestrzeni wypełnionej różnymi urojonymi kołami zębatymi i zapadkami. Kiedy pozbyliśmy się tych wszystkich "mechanizmów", teoria okazała się OK. Dirac odkrył poprawne prawa relatywistycznej mechaniki kwantowej, po prostu odgadując, jak powinno wyglądać odpowiednie równanie. Metoda zgadywania często okazuje się zaskakująco skuteczna. To dowodzi, że matematyka jest właściwym i bardzo głębokim sposobem mówienia o naturze, a liczne próby opisu przyrody za pomocą intuicji filozoficznych oraz przesądów "zdroworozsądkowych" nie są szczególnie skuteczne.

Zawsze męczyło mnie, że zgodnie z prawami fizycznymi, tak jak je obecnie rozumiemy, maszyna licząca musi wykonać nieskończenie wiele operacji logicznych, aby potwierdzić to, co

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
się dzieje w dowolnie małym obszarze przestrzeni w dowolnie krótkim czasie. W jaki sposób tak wiele może się dzieć w tak małej objętości? Dlaczego stwierdzenie, co się dzieje w jednym, niewielkim obszarze czasoprzestrzeni, wymaga nieskończenie wielu operacji logicznych? Często wysuwałem hipotezę, że w przyszłości fizyka nie będzie wymagała takich matematycznych procedur, że przenikniemy całą tę maszynierię i być 8 Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984) - angielski fizyk. w 1933 roku wspólnie ze Schrödingerem otrzymał Nagrodę Nobla.

Związek między matematyką i fizyką 63  
może okazać się, że prawa fizyczne są proste niczym reguły przestawiania pionków na szachownicy, choć sama gra jest bardzo skomplikowana. To jednak jest tylko pewna spekulacja, w rodzaju opinii "Lubię to", "Nie lubię tamtego". Lepiej unikać tak silnych przesądów.  
Podsumowując, gotów jestem powtórzyć słowa Jeansa, który powiedział, że "wielki Architekt najwyraźniej jest matematykiem". Trudno przekazać tym, którzy nie znają matematyki, prawdziwe poczucie piękna, głębokiego piękna natury. C. P. Snow pisał o dwóch kulturach. Naprawdę myślę, że pod względem kulturowym można podzielić ludzi na dwie grupy, w zależności od tego, czy znają matematykę na tyle dobrze, aby móc docenić piękno natury, czy też jej nie znają. Szkoda, że matematyka tak wielu ludziom sprawia trudności. Podobno - nie wiem, czy ta historia jest prawdziwa - pewien król, który usiłował nauczyć się geometrii od Euklidesa, narzekał, że jest ona taka trudna. "Nie ma królewskiej drogi do geometrii", odpowiedział Euklides... I rzeczywiście, królewska droga nie istnieje. Fizycy nie mogą zmienić używanego języka. Jeśli ktoś chce zrozumieć i nauczyć się cenić piękno natury, musi opanować język, którym ona przemawia. Natura mówi o sobie tylko w jednym języku. Nie możemy być na tyle pyszni, aby żądać zmiany, nim zaczniemy słuchać. Żadne intelektualne argumenty nie pozwolą głuchemu zrozumieć, na czym naprawdę polega muzyka. Podobnie, żaden intelektualny argument nie pomoże zrozumieć natury przedstawicielom "drugiej kultury". Filozofowie mogą próbować kogoś czegoś uczyć, powtarzając jakościowe stwierdzenia o naturze. I ja usiłuję ją opisać. Nie jestem jednak w stanie przekazać całej wiedzy, ponieważ bez matematyki jest to niemożliwe. Zapewne z powodu "humanistycznego" ograniczenia horyzontów niektórzy ludzie są w stanie wyobrazić sobie, że człowiek stanowi centrum wszechświata.

#### wielkie zasady zachowania

Gdy uczymy się fizyki, dowiadujemy się, że istnieje wiele skomplikowanych i szczegółowych praw, praw grawitacji, elektryczności i magnetyzmu, oddziaływań jądrowych i tak dalej. Jednak nad tymi szczegółowymi prawami dominują pewne wielkie, ogólne zasady, z którymi muszą się zgadzać wszystkie prawa. Takimi zasadami są na przykład zasady zachowania, pewne reguły symetrii, ogólne zasady mechaniki kwantowej i niestety, lub na szczęście, jak to rozważaliśmy w poprzednim rozdziale, również zasady matematyki. W tym wykładzie zamierzam mówić o zasadach zachowania. Fizycy czasami używają zwykłych słów w bardzo szczególny sposób. Dla fizyka zasada zachowania oznacza, że jeśli obliczymy wartość pewnej wielkości fizycznej, to choćby dany układ ewoluował w dowolny sposób, ilekroć sprawdzimy tę wielkość ponownie, zawsze otrzymamy taki sam wynik. Liczba określona przez zasadę zachowania się nie zmienia. Przykładem takiej zasady jest zasada zachowania energii. Istnieje pewna wielkość, którą można obliczyć zgodnie z przyjętymi regułami, i wielkość ta jest stała, niezależnie od tego, co się dzieje.

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
łatwo zrozumieć, że zasady zachowania są bardzo przydatne. Przypuśćmy, że fizyka, a raczej sama natura, jest podobna do wielkiej gry w szachy, z milionami figur, a my usiłujemy odgadnąć reguły rządzące ruchami figur. Wielcy bogowie rozgrywają tę partię bardzo szybko i trudno nadażyć za kolejnymi ruchami. Mimo to powoli poznajemy zasady gry. Okazuje się, że obowiązują pewne reguły, które nie wymagają, abyśmy śledzili grę ruch po ruchu. Na przykład przypuśćmy, że na szachownicy jest tylko jeden gońiec, czamopolowy. Ponieważ gońiec porusza się po przekątnych, nigdy nie zmienia koloru

## 66 Charakter praw fizycznych

poła, a zatem jeśli spojrzemy na szachownicę po dłuższej przerwie, możemy oczekiwać, że gońiec wciąż będzie się znajdował na którymś z czarnych pól. Mamy tu zatem zasadę zachowania. Nie musimy szczegółowo śledzić gry, żeby powiedzieć coś prawdziwego o stanie szachownicy.

To prawda, że w szachach prawo takie nie zawsze jest ściśle spełnione. Może się zdarzyć, że gońiec został zбитy lub też pionek doszedł do promocji, a bogowie uznali, że zamiast hetmana lepiej będzie wybrać gońca, pole promocji zaś jest czarne. Niestety, może się okazać, że w fizyce niektóre z naszych zasad zachowania również nie są ściśle spełnione, ale na razie pominię ten problem.

Jak już wspomniałem, fizycy często używają zwykłych słów w znaczeniu bardziej ścisłym. W tytule tego wykładu znalazło się na przykład słowo "wielkie": "wielkie zasady zachowania". Słowo to nie ma jednak charakteru naukowego; użyłem go tylko dla większego efektu. Równie dobrze mogłem wybrać tytuł "Zasady zachowania". Istnieje kilka zasad zachowania, które nie są ściśle spełnione. Zasady te są tylko w przybliżeniu słuszne, lecz mimo to często okazują się bardzo przydatne. Zasady takie moglibyśmy nazwać "małymi" zasadami zachowania. Później wspomnę o jednej lub dwóch takich właśnie zasadach, ale w tym wykładzie mówić będę przede wszystkim o zasadach całkowicie ścisłych, przynajmniej zgodnie z naszą obecną wiedzą.

Zacznę od zasady, którą najłatwiej zrozumieć, mianowicie zasady zachowania ładunku elektrycznego. Istnieje pewna liczba, określająca całkowity ładunek elektryczny wszechświata, i niezależnie od jego ewolucji liczba ta się nie zmienia. Jeśli ładunek znika w jednym miejscu, można go odnaleźć w innym. Zasadzie zachowania podlega całkowity ładunek elektryczny. Fakt ten stwierdził doświadczalnie Faraday<sup>9</sup>. Podczas doświadczenia Faraday siedział w wielkiej metalowej kuli, połączonej z bardzo czułym galwanometrem, służącym do pomiaru ładunku na kuli. Nawet niewielka zmiana ładunku

<sup>9</sup> Michael Faraday (1791-1867) - angielski fizyk.

## wielkie zasady zachowania 67

byłaby łatwo zauważalna. Wewnątrz kuli Faraday umieścił rozmaite urządzenia elektryczne. Elektryzował szkło, pocierając je futrem, i uruchamiał wielką maszynę elektrostatyczną, tak że wewnątrz kuli wyglądało jak laboratorium z horrorów. W czasie tych wszystkich doświadczeń na powierzchni kuli nie zgromadził się żaden ładunek. Całkowity ładunek się nie zmienił. Wprawdzie po potarciu futrem szklany pręt był naelektryzowany dodatnio, ale na futrze równocześnie zgromadził się taki sam ładunek, tyle że ujemny, a zatem ładunek całkowity był w dalszym ciągu równy zero. Gdyby wewnątrz kuli powstał jakiś ładunek, spowodowałoby to reakcję galwanometru na zewnątrz. Wynika z tego, że całkowity ładunek jest zachowany. Zachowanie ładunku łatwo zrozumieć: pomoże nam w tym bardzo prosty model, i to bynajmniej nie matematyczny. Przypuśćmy, że świat jest zbudowany z cząstek dwóch rodzajów, elektronów i protonów. Kiedyś wydawało się, że rze-



Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
czywiście świat jest taki prosty. Elektrony mają ładunek ujemny, a protony dodatni, a zatem można je porozdzielać. Możemy wziąć jakieś ciało i dodać lub ująć nieco elektronów. Załóżmy, że elektrony i protony są trwałe, nigdy się nie rozpadają ani nie znikają; jest to bardzo proste założenie, nie wymagające zastosowania matematyki. Całkowita liczba protonów minus całkowita liczba elektronów nigdy się nie zmienia. W rzeczywistości w takim modelu nie zmienia się ani liczba protonów, ani liczba elektronów, ale tutaj chodzi nam o ładunek. Protony wnoszą dodatni wkład do ładunku, elektrony ujemny, i jeśli te cząstki nie powstają ani nie giną oddzielnie, to całkowity ładunek jest zachowany. Oto lista różnych właściwości wielkości zachowanych, którą będziemy wypełniać w miarę posuwania się do przodu. Zaczynam od ładunku (Tab. 1). W odpowiedzi na pytanie, czy ładunek jest zachowany, piszę "tak".  
To teoretyczne wyjaśnienie jest bardzo proste, ale później się okazało, że elektrony i protony mogą jednak powstawać i ginąć. Na przykład pewna cząstka, tak zwany neutron, rozpada się na proton, elektron i jeszcze jedną cząstkę, o której będzie mowa poniżej. Neutron jest elektrycznie obojętny, a za-

68 Charakter praw fizycznych  
-UNEK BŁOWA DZIWNOSC ENERGIA  $\Delta g$ "  
zachowany  
(lokalnie)  
dyskretny  
jest źródłem  
pola

tak  
tak  
tak

tak  
tak  
?

prawie  
tak  
?

tak tak  
nie tak  
tak

Tab. 1. Oto tabela, którą profesor Feynman wypełniał w trakcie wykładu. tem choć w tej reakcji powstają proton i elektron, bilans ładunku się zgadza. Na początku mieliśmy ładunek zerowy, a na końcu jeden ładunek dodatni i jeden ujemny; zatem ładunek całkowity jest nadal równy zeru.  
Z podobną sytuacją mamy do czynienia w związku z istnieniem prócz protonu jeszcze jednej cząstki o dodatnim ładunku, tak zwanego pozytonu, który pod wieloma względami przypomina elektron. Pozyton ma jednak ładunek dodatni i, co najważniejsze, uważamy go za antycząstkę, bo gdy dochodzi do spotkania pozytonu z elektronem, obie cząstki znikają i nie zostaje po nich nic prócz światła. A zatem elektrony mogą powstawać i ginąć. Elektron plus pozyton daje światło. W rzeczywistości to "światło" jest niewidoczne, ponieważ ma postać promieniowania gamma. Z punktu widzenia fizyka nie ma to znaczenia, światło bowiem różni się od promieniowania gamma tylko długością fali. A zatem możliwa jest anihilacja cząstki i antycząstki. Światło również nie ma ładunku elektrycznego, ale podczas anihilacji znika jeden ładunek dodatni i jeden ujemny, a zatem ładunek całkowity się nie zmienia.

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)

Teoria zachowania ładunku jest więc nieco bardziej skomplikowana, niż przyjęliśmy początkowo, ale nie wymaga złożonej matematyki. Po prostu dodajemy liczbę pozytonów do liczby protonów, po czym odejmujemy liczbę elektronów - musimy jeszcze uwzględnić różne dodatkowe cząstki, na przykład antyprotony, które mają ładunek ujemny, mezony pi-plus, mające znak dodatni, i tak dalej. W istocie wszystkie cząstki elementarne mają ładunek (czasami zerowy). Musimy obliczyć ładu-

## Wielkie zasady zachowania 69

nek całkowity; później, niezależnie od zachodzących reakcji, ładunek musi być równy ładunkowi początkowemu. To jest jeden aspekt zasady zachowania ładunku. Teraz pojawia się interesujące pytanie. Czy wystarczy powiedzieć, że ładunek jest zachowany, czy też musimy jeszcze coś dodać? Gdyby ładunek był zachowany, ponieważ zawsze ma postać rzeczywistej cząstki, która się porusza, miałby on bardzo charakterystyczną cechę. Całkowity ładunek w zamkniętym pudle może być zachowywany na dwa sposoby. Możliwe, że ładunek porusza się wewnątrz pudła. Możliwe również, że ładunek nagle znika w jednym punkcie i w tym samym momencie pojawia się w innym punkcie, dzięki czemu całkowity ładunek w pudle nigdy się nie zmienia. Druga możliwość ma zupełnie inny charakter niż pierwsza, zgodnie z którą, jeśli ładunek znika w jednym miejscu i pojawia się w innym, to między tymi punktami musi przelecieć jakaś cząstka. Mówimy wtedy, że ładunek jest zachowany lokalnie; jest to znacznie bardziej szczegółowe stwierdzenie niż prosta uwaga, że całkowity ładunek się nie zmienia. Jak widać, poprawiamy nasze prawo, o ile oczywiście jest prawdą, że ładunek podlega lokalnemu prawu zachowania. W istocie jest to prawda. Staram się od czasu do czasu pokazywać możliwości wnioskowania, łączenia idei. Teraz chciałbym przedstawić pewien argument, w zasadzie sformułowany przez Einsteina, który wskazuje, że jeśli pewna wielkość jest zachowana - w tym przypadku jest nią ładunek - to musi być zachowana lokalnie. Argument Einsteina opiera się na twierdzeniu, że jeśli dwaj faceci mijają się, podróżując statkami kosmicznymi, to nie można odpowiedzieć na pytanie, który się porusza, a który stoi. Żaden eksperyment nie pozwoli rozstrzygnąć tej kwestii. Twierdzenie to nazywamy zasadą względności ruchu; stwierdza ona, że jednostajny ruch prostoliniowy jest względny i możemy rozpatrywać dowolne zjawisko z punktu widzenia dowolnego astronauty i że przy tym nie sposób ustalić, który się porusza, a który spoczywa. Przypuśćmy, że mamy dwa statki kosmiczne, A i B (ryc. 3.1). Przyjmę tu punkt widzenia, że to A wyprzedza B. Proszę pamiętać, że to tylko moja opinia; równie dobrze można przy-

## 70 Charakter praw fizycznych

A  
A

f\

•A

A

A

Potożenia w chwili.,  
gdy zachodzę zdarzenia

Ryc. 3.1

otozeiua w chwili,

gc(y & widzi zdarzenia

jąć odwrotny punkt widzenia i dojdzie się wtedy do identycznych wniosków na temat przebiegu zjawisk. Załóżmy teraz, że astronauta w spoczynku pragnie udowodnić, iż w tej samej chwili zniknął ładunek z przedniej części jego statku i pojawił się w tylnej. Aby mieć pewność, że zdarzenia te nastąpiły równocześnie, astronauta nie może siedzieć z przodu, ponieważ wtedy z uwagi na drogę, jaką musi pokonać światło, zobaczyłby, jak najpierw znikną ładunek z przedniej części statku. Przyjmijmy zatem, że astronauta jest bardzo dokładny i siedzi idealnie pośrodku statku. Drugi astronauta obserwuje to samo zjawisko z' pokładu swojego statku. Nagle uderza piorun i w punkcie x powstaje ładunek, a jednocześnie w punkcie y z drugiej strony statku ładunek znika. Proszę zwrócić uwagę, że zjawisko to zachodzi w jednej chwili i jest w pełni zgodne z zasadą zachowania ładunku. Jeśli stracimy jeden elektron w jednym miejscu, zyskujemy inny w drugim, ale między tymi punktami nie następuje wymiana żadnej cząstki. Załóżmy teraz, że gdy ładunek znika lub się pojawia, następuje błysk światła, dzięki czemu wiemy, co się dzieje. B twierdzi, iż oba błyski nastąpiły równocześnie, ponieważ wie, że siedzi w środku statku i światło z punktu x dotarło do niego w tym samym momencie co światło z punktu y. B powiada zatem: "Owszem, gdy jeden ładunek zniknął, w tym samym momencie pojawił się drugi". A co na to nasz przyjaciel z drugiego statku? On mówi: "Nie, mylisz się, przyjacielu. widziałem, że najpierw nastąpił błysk w x, a później wy". Jest tak dlatego, że A porusza się w kierunku

wielkie zasady zachowania 11

ku x, a zatem światło z x ma do pokonania krótszą drogę niż z y i dociera do niego odpowiednio wcześniej. "Nie, ładunek v x pojawił się wcześniej, niż zniknął ładunek wy, a zatem przez krótki czas między jednym zdarzeniem a drugim miałem dodatkowy ładunek - mógłby powiedzieć A. - To jest sprzeczne z prawem zachowania ładunku". "Tak, ale ty się poruszasz" - odpowiada B. "Skąd wiesz? - pyta A. - Moim zdaniem, to ty się poruszasz". I tak dalej. Jeśli nie możemy za pomocą żadnego eksperymentu wykryć zależności praw fizycznych od tego, czy się poruszamy, czy nie, to gdyby ładunek nie był zachowany lokalnie, tylko niektórzy obserwatorzy widzieliby, że zasada zachowania jest spełniona, mianowicie obserwatorzy w stanie absolutnego spoczynku. Zgodnie z zasadą względności Einsteina jest to niemożliwe, a zatem musimy przyjąć, że ładunek jest zachowany lokalnie. Lokarność zachowania ładunku jest zgodna z teorią względności. Okazuje się, że tak jest w przypadku wszystkich zasad zachowania. Łatwo zrozumieć, że jeśli coś jest zachowane, to obowiązuje ta sama reguła.

ładunek elektryczny ma jeszcze jedną interesującą cechę, bardzo dziwną cechę, której nie potrafimy wyjaśnić. Nie ma ona nic wspólnego z zasadą zachowania i jest od niej całkowicie niezależna. Otóż ładunek zawsze jest wielokrotnością pewnej podstawowej jednostki ładunku. O takich wielkościach mówimy, że są "dyskretne". Gdy mamy cząstkę o pewnym ładunku, ładunek jej może być równy plus dwa, plus dwa, minus jeden lub minus dwa, i tak dalej.\* Wracając do naszej tabeli, muszę zapisać, choć nie ma to nic wspólnego z zasadą

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
zachowania, że wielkość zachowana występuje w postaci całkowitych wielokrotności jednostki podstawowej. To bardzo ładnie, ponieważ dzięki temu łatwiej można zrozumieć zachowanie ładunku. Ładunek to pewna rzecz, którą można liczyć i która przemieszcza się w przestrzeni. Na koniec należy dodać, że wykrycie ładunku jest bardzo proste, ponieważ ma on \* wyjątkiem od tej reguły są kwarki, które mają ładunki 2/3 i 1/3, jednak kwarki nigdy nie występują swobodnie, lecz tylko w układach związanych, których całkowity ładunek jest liczbą całkowitą (przyp. tłum.).

## 72 Charakter praw fizycznych

jeszcze jedną bardzo ważną cechą: jest źródłem pola elektrycznego i pola magnetycznego. Ładunek jest miarą siły, z jaką dany obiekt oddziałuje z polem elektromagnetycznym. W tabeli powinniśmy również odnotować, że ładunek jest źródłem pola, innymi słowy, elektryczność jest związana z ładunkiem. Wobec tego wielkość podlegająca zasadzie zachowania ma jeszcze dwie bardzo ważne cechy, które nie są jednak bezpośrednio związane z tą zasadą. Po pierwsze, ładunek jest dyskretny; po drugie, jest źródłem pola.

Istnieje wiele zasad zachowania. Chciałbym wymienić jeszcze kilka z nich, podobnych w tym sensie do zasady zachowania ładunku, że polegają na prostym liczeniu. Mamy więc tak zwaną zasadę zachowania liczby baryonowej. Neutron może zmienić się w proton. Jeżeli każdy neutron i każdy proton potraktujemy jako jedną jednostkę, powinniśmy otrzymać liczbę baryonową. Neutron ma liczbę baryonową plus jeden, proton również ma liczbę baryonową plus jeden. Teraz już tylko liczymy! Jeśli zatem rzeczywiście zachodzi reakcja rozpadu neutronu na proton, elektron i antyneutrino, to całkowita liczba baryonowa się nie zmienia. Jednak w naturze występują jeszcze inne reakcje między cząstkami elementarnymi. Podczas zderzenia protonu z protonem mogą powstać najróżniejsze cząstki, na przykład lambda, proton i mezon K plus. Lambda i K-plus to pewne cząstki elementarne.

(łatwo)  $P + P \rightarrow \Lambda + p + \pi^+$

Przed reakcją mamy dwa baryony, ale po reakcji widzimy tylko jeden, a zatem należy sprawdzić, czy lambda lub K-plus to baryony. Badając właściwości cząstki lambda, można stwierdzić, że bardzo powoli rozpada się na proton i pion, a następnie pion rozpada się na elektrony i coś tam jeszcze.

(wolno)  $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$

W wyniku rozpadu cząstki lambda pojawia się zatem jeden baryon. Wobec tego możemy uważać, że lambda ma liczbę ba-

## wielkie zasady zachowania 73

ryonową jeden, a K-plus nie jest baryonem, czyli jego liczba baryonowa wynosi zero.

W naszej tabelicy zasad zachowania mamy zatem bardzo podobną sytuację z baryonami jak z ładunkiem elektrycznym. Znamy regułę wyznaczania liczby baryonowej: jest ona równa liczbie protonów, plus liczba neutronów, plus liczba cząstek lambda, minus liczba antyprotonów, minus liczba antyneutronów, i tak dalej. Polega to wyłącznie na liczeniu cząstek. Liczba baryonowa podlega zasadzie zachowania, jest dyskretna i choć nikt tego nie wie, wszyscy chcieliby, aby baryony były źródłem pola. Moją tabelę wypisuję głównie dlatego, że przecież próbujemy odgadnąć prawa rządzące oddziaływaniami jądrowymi, a takie porównania bardzo w tym pomagają. Jeśli ładunek elektryczny jest źródłem pola, a liczba baryonowa pod wszystkimi innymi względami jest do niego podobna, to również powinna być źródłem pola. Niestety, jak dotychczas wydaje się, że tak nie jest. Wiemy tu zbyt mało, aby mieć pewność.

Istnieją jeszcze inne zasady zachowania polegające na liczeniu cząstek, na przykład zasada zachowania liczby lepto-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
nowej; ich idea jest dokładnie taka sama jak w przypadku liczby barionowej. Jedną z tych zasad nieco się wyróżnia. Reakcje między cząstkami elementarnymi, które obserwujemy w naturze, przebiegają z różną szybkością. Niektóre z nich zachodzą łatwo i szybko, inne powoli i z trudem. Nie chodzi mi o to, że przeprowadzenie pewnych reakcji jest technicznie łatwe, a innych trudne. Mam na myśli szybkość, z jaką zachodzą reakcje, gdy wszystkie cząstki są obecne. Można z łatwością odróżnić dwa rodzaje reakcji. W tych reakcjach, o których mówiłem, zderzenie dwóch protonów zachodzi bardzo szybko, a rozpad cząstki lambda bardzo wolno. Okazuje się, że jeśli wziąć pod uwagę tylko szybkie reakcje, to obowiązuje jeszcze jedna zasada zachowania. Cząstce lambda przypisujemy liczbę minus jeden, protonowi zero, a mezonowi K-plus - plus jeden. To tak zwana dziwność lub hiperładunek. Wydaje się, że dziwność jest zachowana we wszystkich szybkich reakcjach, ale nie w reakcjach powolnych. W naszej tabeli musimy

#### 74 Charakter praw fizycznych

zatem uwzględnić zasadę zachowania dziwności, która jest w przybliżeniu spełniona. To bardzo osobliwe; właśnie dlatego wielkość tę nazwano dziwnością. Dziwność jest niemal ściśle zachowana i ma charakter dyskretny. Ponieważ dziwność jest zachowana w silnych oddziaływaniach jądrowych, fizycy, którzy próbują wyjaśnić te oddziaływania, zasugerowali, iż jest ona również źródłem pola. I w tym przypadku nie wiemy, jak jest naprawdę. Wspominam o tym, żeby pokazać, jak prawa zachowania mogą pomóc w próbach odgadnięcia nowych praw fizycznych.

Od czasu do czasu ktoś proponuje przyjęcie jeszcze innego prawa zachowania mającego podobny charakter. Na przykład chemicy kiedyś uważali, że niezależnie od tego, co się dzieje, liczba atomów sodu się nie zmienia. W rzeczywistości atomy sodu mogą powstawać i ginąć. Można doprowadzić do transmutacji pierwiastka, tak że oryginalny atom znika. Kiedyś uważano również, że całkowita masa substancji jest zawsze stała. To z kolei zależy od definicji masy i kwestii równowagi masy i energii. Zasada zachowania masy jest szczególnym przypadkiem zasady zachowania energii, którą zaraz omówię. Ze wszystkich zasad zachowania, zasada zachowania energii jest najtrudniejsza do objaśnienia i najbardziej abstrakcyjna, a jednocześnie najbardziej użyteczna. Zasadę zachowania energii trudniej zrozumieć niż zasady, które dotychczas omówiłem. W przypadku ładunku i liczby barionowej mechanizm jest bardzo prosty - chodzi mniej więcej o zachowanie cząstek określonego rodzaju. Nie jest to aż tak proste, ponieważ pojawiają się nowe cząstki, ale w istocie chodzi tu o dość proste liczenie cząstek.

Zasada zachowania energii jest trudniejsza, ponieważ w tym przypadku mamy pewną wielkość, która się nie zmienia, choć ta wielkość nie reprezentuje żadnej konkretnej rzeczy. Chciałbym teraz posłużyć się dość głupawą analogią, żeby wyjaśnić, o co chodzi.

Wyobraźmy sobie, że pewne dziecko ma 28 absolutnie niezniszczalnych klocków, którymi bawi się przez cały dzień. Po powrocie do domu mama liczy klocki i stwierdza, że jest ich

#### wielkie zasady zachowania 75

rzeczywiście 28. Każdego dnia mama sprawdza zasadę zachowania klocków! To ciągnie się przez kilka dni, po czym pewnego dnia mama stwierdza, że jest tylko 27 klocków. Wkrótce jednak znajduje brakujący klocek na trawniku: dziecko wyrzuciło go przez okno. Zasadnicza sprawa, którą należy wziąć pod uwagę, rozpatrując dowolne zasady zachowania, to konieczność śledzenia, czy badana wielkość nie "znika". Zmiana może nastąpić również w odwrotnym kierunku. Na przykład

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)

do dziecka mógł przyjść kolega, który przyniósł identyczne klocki. O takich możliwościach należy, rzecz jasna, pamiętać, rozpatrując zasady zachowania. Przypuśćmy teraz, że pewnego dnia po powrocie mama stwierdza, że jest tylko 25 klocków. Podejrzewa, że dziecko schowało klocki w pudełku na zabawki. "Otworzę pudełko" - mówi. "Nie, nie możesz otworzyć" - sprzeciwia się mały. Mama jest jednak bardzo sprytna. "Wiem, że puste pudełko waży 16 uncji, każdy klocek waży 3 uncje, a zatem zaraz zważę pudełko" - mówi. Licząc klocki - mama dostaje zatem wzór:

liczba klocków widocznych +  
waga pudełka - 16 uncji  
3 uncje

i rzeczywiście, całkowita liczba klocków wynosi 28. Przez jakiś czas wszystko jest w porządku, ale pewnego dnia suma znów się nie zgadza. Mama zauważyła jednak, że zmienił się poziom wody w zlewie. Wie, że gdy w zlewie nie ma klocków, poziom wody wynosi 6 cali; po wrzuceniu jednego klocka woda unosi się o 1/4 cala. Mama uwzględnia to i teraz wzór służący do obliczania liczby klocków wygląda następująco:

liczba klocków widocznych +  
waga pudełka - 16 uncji  
3 uncje

głębokość wody - 6 cali  
1/4 cala

Całkowita liczba klocków wynosi znowu 28. W miarę jak chłopiec wpada na coraz nowe pomysły, mama musi uwzględnić coraz więcej wyrazów, które reprezentują ukryte klocki,

## 76 Charakter praw fizycznych

ale z matematycznego punktu widzenia są to wciąż abstrakcyjne obliczenia, ponieważ klocków nie widać.

Teraz chciałbym wyjaśnić, co ma wspólnego ta historia z zasadą zachowania energii. Przyjmijmy najpierw, że w żadnej sytuacji nigdy nie widzimy żadnych klocków. Wyrażenie "liczba widocznych klocków" nigdy się nie pojawia. Mama zawsze oblicza liczne wyrazy typu "klocki w pudełku" i "klocki w wodzie". W porównaniu z energią różnica polega na tym, że - o ile wiemy - nie istnieją żadne "klocki" energii. Poza tym, w przypadku energii liczby odpowiadające poszczególnym wyrazom nie muszą być całkowite. Przypuszczam, że biednej mamie może się zdarzyć, iż jeden wyraz daje 6 1/8 klocka, następny 7/8 klocka, lecz wszystkie pozostałe razem 21, tak że suma jednak się zgadza. I tak jest w każdym razie w przypadku energii. Dla energii mamy pewien schemat, składający się ze zbiorów reguł. Każdy zbiór reguł pozwala nam obliczyć ilość energii pewnego rodzaju. Gdy dodamy do siebie wyniki otrzymane dla wszystkich rodzajów energii, zawsze dostajemy taki sam wynik końcowy. Jednak o ile wiemy, nie istnieje żadna naturalna jednostka energii. Mamy tylko abstrakcyjny formalizm matematyczny, który pozwala obliczać pewną wielkość i okazuje się, że gdy to zrobimy, wynik zawsze wychodzi nam taki sam. Nie potrafię tego lepiej wytłumaczyć.

Istnieje bardzo wiele rodzajów energii, analogicznie do klocków w pudełku, klocków w wodzie i tak dalej. Istnieje energia związana z ruchem, tak zwana energia kinetyczna, energia związana z oddziaływaniami grawitacyjnymi, czyli energia potencjalna, energia cieplna, energia elektryczna, energia świetlna, energia sprężystości, energia chemiczna, energia jądrowa i tak dalej. Istnieje również energia, którą cząstka ma po prostu dlatego, że istnieje. Ta energia zależy bezpośrednio od masy cząstki. Jak z pewnością wszyscy wiecie, ten ostatni wyraz wprowadził Einstein. Mówię tu o słynnym wzorze  $E=mc^2$ .

Wymieniłem tu kilka różnych rodzajów energii; chciałbym zarazem wyjaśnić, że nie jesteśmy ignorantami i rozumiemy związki między niektórymi rodzajami energii. Na przykład tak zwana energia cieplna jest w znacznej mierze równa sumie

Wielkie zasady zachowania 77  
energii kinetycznych wszystkich cząsteczek znajdujących się w danym ciele. Energia sprężystości i energia chemiczna mają takie samo źródło, są nim siły międzyatomowe. Gdy zmienia się układ atomów, następuje również zmiana ich energii, a to oznacza, że gdzie indziej także musi nastąpić zmiana energii. Na przykład podczas spalania maleje energia chemiczna, której kosztem powstaje ciepło, gdyż bilans musi się zgadzać. Energia sprężystości i energia chemiczna związane są z oddziaływaniami międzyatomowymi. Dziś wiemy, że oddziaływania te stanowią sumę dwóch czynników, energii elektrycznej i energii kinetycznej, tyle że obliczanej zgodnie z regułami mechaniki kwantowej. Energia światła to nic innego jak energia elektryczna, ponieważ światło to fala elektromagnetyczna. Energii jądrowej nie można przedstawić w postaci innych rodzajów energii; w tej chwili mogą tylko powiedzieć, że jest ona wynikiem oddziaływań jądrowych. Nie mówię tu wyłącznie o energii, która może być uwolniona. Na przykład jądro uranu zawiera pewną energię. Podczas jego rozpadu ilość energii zawarta w powstających jądrach zmienia się, ale całkowita energia jest stała; podczas rozpadu powstaje dużo ciepła i innych rodzajów energii, i ostatecznie bilans się zgadza. Zasada zachowania energii bardzo się przydaje w rozwiązaniach naukowych. Podam teraz kilka bardzo prostych przykładów, aby pokazać, że znajomość prawa zachowania energii i wzorów służących do obliczania energii pozwala zrozumieć inne prawa fizyczne. Inaczej mówiąc, prawa fizyczne często nie są niezależne, lecz stanowią zakamuflowane sformułowanie zasady zachowania energii. Najprostszym przykładem jest prawo dźwigni (ryc. 3.2).

A

A'  
Ryc. 3.2

## 78 Charakter praw fizycznych

### Wielkie zasady zachowania 79

Mamy tu dźwignię dwuramienną. Jedno ramię ma jedną stopę długości, a drugie - cztery stopy. Najpierw muszę podać prawo określające energię grawitacyjną. Gdy mamy szereg ciężarów, grawitacyjną energię potencjalną obliczamy w następujący sposób. Dla każdego z odważników obliczamy iloczyn ciężaru i wysokości ponad ziemią, po czym sumujemy wyniki. W ten sposób dostajemy całkowitą energię potencjalną. Przypuśćmy, że na dłuższym ramieniu spoczywa odważnik dwufuntowy, a na krótszym pewien nieznaną ciężar. Niewiadomą oznacza się zazwyczaj  $X$ ; tym razem wybierzmy więc  $W$ , by sprawić wrażenie, że oderwaliśmy się od codzienności! Teraz mamy do rozwiązania problem, jaki musi być ciężar  $W$ , aby dźwignia pozostawała w równowadze i można nią było swobodnie poruszać tam i z powrotem. Jeśli można poruszać dźwignię bez najmniejszego wysiłku, oznacza to, że jej energia pozostaje taka sama, niezależnie od tego, czy dźwignia jest pozioma, czy pochylona tak, że dwufuntowy odważnik znajduje się cał powyżej poziomu. Jeśli energia nie zależy od wychylenia dźwigni, to dźwignia pozostaje w spoczynku. Jeśli dwufuntowy ciężarek wzniosł się o jeden cal, to o ile obniżył się ciężar  $W$ . Z rysunku widać, że skoro  $AO$  ma długość jednej stopy, a  $OB$  czterech stóp, to jeśli  $BB'$  wynosi 1 cal, to  $AA'$  ma  $1/4$  cala. Teraz zastosujemy prawo zachowania energii do energii potencjalnej. Gdy dźwignia była w poziomie, oba ciężarki miały zerową wysokość, a zatem energia całkowita rów-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
na była zeru. Żeby obliczyć energię potencjalną po tym, jak dźwignia się wychyliła, mnożymy ciężar 2 funtów przez wysokość 1 cala i dodajemy nieznany ciężar w pomnożony przez -1/4 cala. Suma musi być równa zeru. Zatem  $2 - \lambda = 0$ , czyli  $\lambda = 8$ .  
W ten sposób można zrozumieć proste prawo, prawo dźwigni, które z pewnością wszyscy znają. Interesujące jednak, że setki innych praw fizycznych można ściśle powiązać z rozmaitymi postaciami energii. Powyższy przykład przedstawiłem tylko po to, aby zilustrować, jak użyteczna jest ta zasada.

Pozostaje jednak jeden kłopot: w praktyce te wyniki się nie sprawdzają z powodu tarcia na osi. Gdybym miał jakieś poruszające się ciało, na przykład kulkę toczącą się po poziomej podłodze, to po pewnym czasie kulka zatrzymałaby się z powodu tarcia. Co się stało z energią kinetyczną kulki? Odpowiedź brzmi, że energia ruchu kulki została przekazana gwałtownie poruszającym się atomom w kulce i podłodze. Świat oglądany w dużej skali wydaje się gładki niczym wypolerowana powierzchnia kulki, ale w małej skali jest bardzo skomplikowany. Oglądając kulkę w powiększeniu, moglibyśmy zobaczyć miliardy atomów tworzących nieregularne struktury. W takiej skali kulka wygląda jak nieociosany głaz, podłoga zaś jak wyboista żwirowa droga. Gdy toczymy nasz potworny głaz po wybojach, widzimy, że atomy nieustannie zaczepiają o siebie i drgają. Gdy kulka się przetoczy, atomy podłogi, które były na jej drodze, wciąż jeszcze gwałtownie dygoczą. Oznacza to, że wzrosła energia cieplna podłogi. Na pierwszy rzut oka wydaje się, że zasada zachowania energii nie jest spełniona, ale w rzeczywistości energia ma tendencję do ukrywania się przed nami i musimy skorzystać z termometrów i innych instrumentów, aby upewnić się, że nie zniknęła. Energia jest zachowana niezależnie od tego, jak skomplikowane są zachodzące procesy, nawet jeśli nie znamy szczegółowych praw regulujących ich przebieg.  
Zasadę zachowania energii jako pierwszy zademonstrował pewien lekarz, a nie fizyk. Do wykazania zasady zachowania energii wykorzystał on szczury. Gdy spalimy żywność, możemy zmierzyć, ile powstaje przy tym ciepła. Jeśli szczury zjadają taką samą ilość jedzenia, to po połączeniu z tlenem ulega ono przemianie w dwutlenek węgla, tak samo jak podczas spalania. Jeśli zmierzymy energię, to przekonamy się, że odpowiednie procesy przebiegają w organizmach żywych podobnie jak w układach nieożywionych. Zasada zachowania energii dotyczy tak samo życia, jak innych zjawisk. Interesujące, że ilekroć mamy okazję sprawdzić, czy prawo obowiązujące w układach nieożywionych obowiązuje również w zjawisku zwanym życiem, zawsze okazuje się, że tak. Nie ma żadnych dowodów

80 Charakter praw fizycznych  
wskazujących, że zjawiska przebiegające w organizmach są odmienne pod względem obowiązujących w nich praw fizycznych niż jakiegokolwiek inne procesy, choć oczywiście żywe organizmy są z reguły znacznie bardziej skomplikowane.  
Ilość energii w jedzeniu, która mówi nam, ile ciepła, pracy mechanicznej itd. może ono wytworzyć, mierzymy w kaloriach. Gdy mowa jest o kaloriach, nie chodzi o jakąś zjadaną substancję, lecz o ilość energii cieplnej zawartej w jedzeniu. Fizycy uważają się czasami za lepszych i mądrzejszych od innych, więc ludzie chcą ich przyłapać na jakiejś głupocie. Oto coś, co można im wytykać. Fizycy powinni się wstydzić tego, w jaki sposób mierzą energię, posługując się najróżniejszymi jednostkami. To absurd, że energię mierzy się w kaloriach, ergach, elektronowoltach, dżulach, kilowatogodzinach: wszystkie te jednostki służą przecież do mierzenia tej samej wielkości! To tak, jakby używać jednocześnie dolarów, funtów i tak



Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
dalej. Choć w przeciwieństwie do kursów walut, które się zmieniają, te różne miary fizyczne mają ustalone stosunki. Bliższa będzie może analogia do szylingów i funtów: funt to zawsze dwadzieścia szylinga. Jest jeszcze jedna komplikacja: fizycy, zamiast stosować proste stosunki, takie jak dwadzieścia do jednego, stosują liczby ułamkowe. To tak, jakby funt zawierał 1,6183178 szylinga. Można by przypuszczać, że przynajmniej wyrafinowani współcześni fizycy teoretycy użyją wspólnej jednostki, ale w ich pracach wciąż można znaleźć takie jednostki energii, jak stopnie Kelvina, megaherce, i tak dalej. Jeśli ktoś chce znaleźć dowód, że fizycy są zwykłymi ludźmi, doskonałym dowodem jest używanie różnych jednostek energii. Znamy wiele interesujących zjawisk naturalnych, w których pojawiają się zagadkowe problemy energetyczne. Niedawno astronomowie odkryli nowe obiekty, tak zwane kwazary, które znajdują się w ogromnej odległości od nas i emitują olbrzymią ilość energii w postaci światła i fal radiowych. Na razie trudno wyjaśnić, skąd bierze się ta energia. Jeśli obowiązuje zasada zachowania energii, to w wyniku wyemitowania tak wielkiej energii stan kwazara musi się zmienić. Czy promieniowanie powstaje kosztem energii grawitacyjnej? Czy

Wielkie zasady zachowania 81

kwazar to obiekt, który się zapadł grawitacyjnie lub jest w jakimś innym stanie? A może kwazar świeci kosztem energii jaądrowej? Nikt tego nie wie.\* Ktoś może wysunąć hipotezę, że w tym przypadku zasada zachowania energii nie jest spełniona. Gdy mamy jednak do czynienia ze zjawiskiem tak słabo zbadanym jak kwazary, a kwazary są tak daleko, że astronomowie nie mogą ich dobrze dojrzeć - przy czym zjawisko to wydaje się sprzeczne z jakimś fundamentalnym prawem - to bardzo rzadko się zdarza, aby błędne były fundamentalne prawa. Zazwyczaj po prostu nie znamy szczegółów zjawiska. Innym interesującym przypadkiem jest wykorzystanie zasady zachowania energii w analizie rozpadu neutronu na proton, elektron i antyneutrino. Początkowo uważano, że neutron rozpada się na proton i elektron. Można jednak było zmierzyć energię wszystkich cząstek i okazało się, że energia protonu i elektronu jest mniejsza od energii neutronu. Ten wynik można było wyjaśnić na dwa sposoby. Możliwe, że nie obowiązuje zasada zachowania energii. I rzeczywiście, przez pewien czas Bohr<sup>10</sup> twierdził, że zasada ta obowiązuje tylko w sensie statystycznym, po uśrednieniu. Okazało się jednak, że słuszna była druga hipoteza, iż bilans energii się nie zgadza, ponieważ w rozpadzie powstaje jeszcze jedna cząstka, tak zwane antyneutrino. Antyneutrino ma taką energię, aby bilans się zgadzał. Można powiedzieć, że jedyną racją istnienia antyneutrino jest zagwarantowanie słuszności zasady zachowania energii. W rzeczywistości jednak neutrino sprawia, że spełnione są również inne zasady zachowania, na przykład momentu pędu. Niedawno udało się bezpośrednio zarejestrować neutrino, a tym samym ostatecznie wykazać, że istnieją. Ten przykład doskonale ilustruje mój wywód. Jak jest możliwa ekstrapolacja naszych zasad zachowania na dziedziny, których dobrze nie znamy? Dlaczego mamy pewność, że skoro sprawdziliśmy zasadę zachowania energii w zakresie znanych

\* Obecnie astronomowie powszechnie przyjmują, że źródłem energii kwazarów jest akrecja materii na czarną dziurę o dużej masie (przyp. Ann.).

<sup>10</sup> Niels Bohr (1885-1962)- duński fizyk.

82 Charakter praw fizycznych

nam zjawisk, to musi ona obowiązywać także w zupełnie nowych sytuacjach? Od czasu do czasu można przeczytać w gazetach, że fizycy odkryli, iż któreś z ich ulubionych praw jest błędne. Czy będzie zatem błędem stwierdzenie, że zasady zachowania obowiązują również w zjawiskach dotychczas nie

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
zbadanych? Jeśli nigdy nie decydujemy się założyć, że jakieś prawo jest słuszne również w dziedzinie, której jeszcze nie zbadaliśmy, to oznacza to, iż w istocie nic nie wiemy. Jeśli uznajemy tylko takie prawa, które zostały właśnie potwierdzone przez obserwację, to nie sformułujemy żadnych przewidywań. A przecież nauka jest użyteczna tylko dzięki temu, że wciąż usiłujemy odgadnąć nowe prawa. Nieustannie się wychylamy; w przypadku zasady zachowania energii jest jednak bardzo prawdopodobne, że obowiązuje ona również w nowych zjawiskach. To oczywiście oznacza, że przewidywania naukowe są niepewne. Z chwilą gdy formułujemy przewidywania dotyczące zjawisk, jakich jeszcze nie zbadaliśmy bezpośrednio, stajemy na niepewnym gruncie. Jednak wypada nam ryzykować takie przewidywania, bo inaczej całe to przedsięwzięcie stałoby się bezużyteczne. Z uwagi na zasadę zachowania energii zmienia się na przykład masa ciała w ruchu. Z powodu równowagi masy i energii energia ruchu przejawia się jako dodatkowa masa, a zatem ciała mają tym większą masę, im większa jest ich prędkość. Newton uważał, że masa jest stała i nie zależy od ruchu. Gdy okazało się, że jego idea była błędna, wszyscy powtarzali, jaką straszną rzeczą jest to, że fizycy się przekonali, iż w przeszłości się mylili. Dlaczego uważali, że mają rację? Efekt relatywistyczny jest bardzo mały i staje się zauważalny tylko wtedy, gdy ciało porusza się z prędkością bliską prędkości światła. Jeśli wprawimy w ruch bąka, jego masa praktycznie się nie zmieni; ściślej mówiąc, względna zmiana jest bardzo mała. Czy zatem fizycy powinni mówić: "Jeśli ciało porusza się z prędkością mniejszą niż pewna prędkość, to jego masa się nie zmienia"? Wtedy niewątpliwie stwierdzenie to byłoby słuszne. Niestety nie, ponieważ konkretne doświadczenie przeprowadzono tylko dla bąków z drewna, miedzi i stali, a zatem fizycy musieliby uczciwie przyznać: "Jeśli bąk z drewna, miedzi lub

### Wielkie zasady zachowania 83

stali porusza się z prędkością mniejszą niż pewna prędkość, to jego masa się nie zmienia". Jak widać, nie znamy wszystkich warunków, które muszą być spełnione w doświadczeniu. Nie wiadomo na przykład, czy radioaktywny bąk ma stałą masę. Jeśli nauka ma być użyteczna, to musimy nieustannie formułować przypuszczenia. Jeśli chcemy uniknąć prostego opisywania doświadczeń, które już zostały wykonane, musimy ekstrapolować poznane prawa poza obszar już zbadany. Nie ma w tym nic złego, choć to powoduje, że nauka nie pozwala na stuprocentowo pewne przewidywania. Jeśli ktoś myślał, że nauka daje pewność, to cóż, po prostu się pomylił. Wróćmy do naszej tabeli zasad zachowania (tab. 1). Możemy do niej dodać energię. O ile wiadomo, prawo zachowania energii jest ściśle spełnione. Energia nie ma postaci dyskretnej. Pozostaje pytanie, czy energia jest źródłem pola. Odpowiedź brzmi: tak. Einstein wyjaśnił, że energia jest źródłem grawitacji. Energia i masa są równoważne, a zatem teoria Newtona, zgodnie z którą to masa jest źródłem grawitacji, wymaga modyfikacji: źródłem grawitacji jest energia. Istnieją jeszcze inne zasady zachowania podobne do zasady zachowania energii, w tym sensie, że zachowana jest tam pewna wielkość liczbowa. Jedną z nich jest zasada zachowania pędu. Jeśli mamy układ składający się z wielu cząstek, możemy obliczyć iloczyn masy i prędkości dla każdej cząstki, a następnie policzyć sumę. W ten sposób otrzymamy całkowity pęd układu. Całkowity pęd jest wielkością zachowaną. Obecnie uważamy, że energia i pęd są ze sobą ściśle powiązane, dlatego umieściłem je w jednej kolumnie tabeli. Innym przykładem wielkości zachowanej jest moment pędu, o którym już mówiliśmy. Moment pędu jest równy powierzchni zakreślonej przez promień wodzący poruszającego się ciała w ciągu jednej sekundy. Przyjmijmy, że mamy pewne ciało w ruchu i wybieramy dowolny punkt jako środek obrotu

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
(ryc. 3.3). Prędkość, z jaką wzrasta powierzchnia zakreślona przez promień wzdłuż tego ciała, pomnożona przez jego masę, to moment pędu. Sumując momenty pędu wszystkich ciał, dostajemy całkowity moment pędu, który jest wielkością za-

#### 84 Charakter praw fizycznych

##### Ryc. 3.3

chowana. Mamy zatem zasadę zachowania momentu pędu. Nawiasem mówiąc, warto zauważyć, że jeśli ktoś "zbyt do-  
brze" zna fizykę, to nadmiernie się spiesząc, może dojść do wniosku, że moment pędu nie jest zachowany. Podobnie jak energia, moment pędu może przybierać różne formy. Wprawdzie większość ludzi uważa, że moment pędu występuje tylko wtedy, gdy mamy poruszające się ciała, ale zaraz wykażę, że jest inaczej. Gdy do pętli z drutu wkładamy magnes, wzrasta strumień pola magnetycznego przechodzącego przez pętlę, co powoduje pojawienie się prądu elektrycznego. W ten sposób działają prądnice. Proszę sobie wyobrazić, że zamiast pętli mamy tarczę z ładunkami na obwodzie, jakby z elektronami w drucie (ryc. 3.4). Teraz bardzo szybko zbliżam do tarczy magnes, przesuwając go idealnie po linii przechodzącej przez jej środek, wskutek czego następuje gwałtowna zmiana strumienia pola magnetycznego przechodzącego przez tarczę. Ładunki na obwodzie, podobnie jak w drucie, zaczynają krążyć, co powoduje ruch tarczy. To wydaje się sprzeczne z zasadą zachowania momentu pędu, ponieważ gdy magnes był daleko,

##### Ryc. 3.4

#### Wielkie zasady zachowania 85

##### Ryc. 3.5

nic się nie poruszało, a teraz wirują ładunki wraz z tarczą. Moment pędu pojawił się znikąd, co jest niezgodne z jego zachowaniem. "Och, już wiem - ktoś mógłby powiedzieć. - Z pewnością jest jeszcze jakaś siła, która wprawia magnes w ruch wirowy". To nieprawda. Nie ma żadnej siły elektrycznej, która dążyłaby do wprawienia magnesu w ruch z prędkością kątową skierowaną odwrotnie do prędkości tarczy. W rzeczywistości chodzi tu o to, że moment pędu występuje w dwóch postaciach: kinetycznego momentu pędu i momentu pędu pola elektromagnetycznego. Pole wokół magnesu ma też pewien moment pędu, choć nie przejawia się on w postaci ruchu. Ten moment pędu ma przeciwny zwrot niż moment pędu ładunków. To widać jeszcze jaśniej, jeśli rozważymy sytuację odwrotną (ryc. 3.5). Ładunki początkowo spoczywają, a magnes znajduje się tuż obok tarczy. Twierdzą, że moment pędu pola elektromagnetycznego wokół układu ma niezerową wartość. Ten moment pędu jest niewidoczny, ponieważ nie przejawia się w postaci ruchu wirowego. Jeśli teraz pociągniemy magnes w dół wzdłuż linii przechodzącej przez środek, nastąpi separacja pola elektrycznego i pola magnetycznego. Pole ma obecnie zerowy moment pędu, a zatem moment pędu musi się pojawić: to powoduje, że tarcza zaczyna się obracać. Zjawiskiem tym rządzi prawo indukcji elektromagnetycznej.

#### 86 Charakter praw fizycznych

Bardzo trudno jest mi odpowiedzieć na pytanie, czy mo-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)

moment pędu jest wielkością dyskretną. Na pierwszy rzut oka wydaje się, że jest rzeczą absolutnie niemożliwą, aby moment pędu był wielkością dyskretną, ponieważ jego wartość zależy od kierunku rzutowania. Patrzymy, z jaką prędkością zmienia się powierzchnia, a to oczywiście zależy od kąta, pod którym obserwujemy dane ciało. Przypuśćmy, że moment pędu jest wielkością dyskretną. Załóżmy, że moment pędu pewnego ciała wynosi 8. Jeśli teraz zmienimy kierunek, to powinniśmy stwierdzić, że moment pędu jest nieco inny, ma być może nieco mniejszą wartość. Jednak 7 nie jest wielkością "nieco mniejszą" niż 8: moment pędu zmienia się tu skokowo. Wobec tego dochodzimy do wniosku, że moment pędu nie może być wielkością dyskretną. Okazuje się jednak, że z powodu pewnych subtelności i osobliwości mechaniki kwantowej ten dowód jest błędny. Jeśli zmierzmy składową momentu pędu wzdłuż dowolnie wybranego kierunku, zawsze otrzymamy wynik będący całkowitą wielokrotnością pewnej podstawowej jednostki momentu pędu. Moment pędu nie jest sumą pewnych jednostek, takich jak ładunek elektryczny cząstek, które można policzyć. Moment pędu jest wielkością dyskretną w sensie matematycznym: jego wartość jest zawsze równa iloczynowi pewnej stałej i liczby całkowitej. Nie możemy tego jednak tłumaczyć w sposób analogiczny jak w przypadku ładunku elektrycznego, składającego się z oddzielnych "cegiełek", które można sobie wyobrazić i je policzyć: jedna, druga i tak dalej. W przypadku momentu pędu nie można przyjąć, że jest on sumą takich oddzielnych jednostek. Lecz mimo to zawsze ma wartość całkowitą... co jest bardzo osobliwe.

Istnieją jeszcze inne zasady zachowania. Nie są one tak interesujące jak te, które opisałem, i nie polegają bezpośrednio na zachowaniu pewnej wielkości. Przypuśćmy, że mamy pewien układ, który składa się z cząstek poruszających się w sposób symetryczny, na przykład ze względu na odbicie od pewnej płaszczyzny (ryc. 3.6). Wtedy, zgodnie z prawami fizyki, można oczekiwać, że choć cząstki poruszają się i zderzają, gdy spojrzymy na układ po jakimś czasie, prędkości cząstek będą

Wielkie zasady zachowania 87

V ^

s ^

Ryc. 3.6

w dalszym ciągu wykazywały taką samą symetrię. Mamy zatem do czynienia z pewną zasadą zachowania, zasadą zachowania symetrii. Należałoby ją uwzględnić w naszej tabeli, ale nie mamy tu do czynienia z zachowaniem wielkości, którą da się mierzyć. Takimi symetrami zajmiemy się bardziej szczegółowo w następnym rozdziale. Opisane zasady nie są szczególnie interesujące w fizyce klasycznej, ponieważ rzadko się zdarza, aby układy makroskopowe miały pożądaną symetrię, zatem zasady takie rzadko można zastosować w praktyce. Natomiast wewnętrzna budowa prostych układów kwantowych, takich jak atomy, wykazuje często symetrie tego rodzaju, które są zachowywane. Z tego powodu zachowanie wspomnianych symetrii ma duże znaczenie dla zrozumienia zjawisk kwantowych.

Warto się zastanowić nad interesującym pytaniem, czy istnieją jakieś głębsze zasady, z których wynikają zasady zachowania, czy też musimy je po prostu przyjąć, nie kusząc się o ich uzasadnienie. Tym problemem zajmę się w następnym wykładzie, ale tutaj chciałbym od razu zwrócić na coś uwagę. Gdy omawiamy zasady zachowania na popularnym poziomie, wydaje się, że mamy do czynienia z wielką liczbą niezależnych pojęć. Głębsza analiza wskazuje jednak, że wszystkie te pojęcia są ze sobą powiązane i jedno pociąga za sobą następne. Przykładem może być związek między zasadą względności

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
i koniecznością przyjęcia lokalnych zasad zachowania. Gdy-  
bym tego nie wyjaśnił, zakrawałoby na cud, że z faktu, iż nie  
można określić prędkości, wynika, że jeśli pewna wielkość jest  
zachowana, to nie polega to na przeskokach między odległymi  
punktami.

## 88 Charakter praw fizycznych

X

### Ryc. 3.7

Chciałbym teraz powiedzieć parę stów o związku między zachowaniem pędu i momentu pędu. Zachowanie momentu pędu ma związek z powierzchnią określaną przez poruszającą się cząstkę. Jeśli mamy wiele cząstek (ryc. 3.7) i wybierzemy punkt odniesienia  $x$  bardzo daleko, to promień wodzący jest niemal taki sam dla wszystkich cząstek. W takim przypadku określaną powierzchnię zależy tylko od odpowiedniej składowej prędkości: na rycinie 3.7 jest to składowa pionowa. Widzimy zatem, że suma iloczynów masy i pionowej składowej prędkości, obliczona dla wszystkich cząstek, musi być stała, ponieważ moment pędu wokół dowolnego punktu ma stałą wartość, a jeśli wybrany punkt jest dostatecznie daleko, to znaczenie mają tylko masy i prędkości cząstek. Przekonaliśmy się, że zachowanie momentu pędu pociąga za sobą zachowanie pędu. Z tego z kolei wynika zachowanie jeszcze jednej wielkości, ale ta zasada jest tak ściśle związana z zachowaniem pędu, że nie uwzględniłem jej w tabeli. Chodzi o zasadę zachowania środka masy (ryc. 3.8).

Masa zamknięta w pudle nie może po prostu sama z siebie zniknąć i pojawić się w innym punkcie. Nie ma to nic wspólnego z zasadą zachowania masy: ilość masy nie zmienia się tu; po prostu masa zmieniała położenie. Tak może zachowywać się ładunek, ale nie masa. Chciałbym wyjaśnić dlaczego. Ruch układu nie wpływa na prawa fizyczne, a zatem możemy

### Ryc. 3.8

## wielkie zasady zachowania 89

założyć, że nasze pudło powoli porusza się do góry. Teraz obliczmy moment pędu względem punktu  $x$  położonego w niewielkiej odległości. Gdy pudło przesuwa się do góry, masa pozostająca w punkcie 1, w spoczynku względem pudła, zakreśla powierzchnię ze znaną prędkością. Gdyby masa nagle przesuwała się do punktu 2, wzrosłaby określaną powierzchnię, ponieważ zwiększyłaby się odległość do punktu  $x$ . Z zasady zachowania momentu pędu wynika, że prędkość, z jaką określaną jest powierzchnię, nie może nagle wzrosnąć, a zatem nie można po prostu przesunąć masy z jednego miejsca w drugie, nie rekompensując w jakiś sposób zmiany momentu pędu. Właśnie dlatego rakiety w pustej przestrzeni nie mogą przyśpieszyć... ale jakoś to robią. Otóż jeśli mamy do dyspozycji kilka mas, to gdy jedna porusza się do przodu, druga musi poruszyć się do tyłu, tak że powodowane zmiany rekompensują się wzajemnie. Tak działa rakietka. Początkowo rakietka wisi nieruchomo w przestrzeni; następnie wyrzuca z tyłu gazy i porusza się naprzód. Natomiast środek masy tego układu nie zmienia swego położenia. Interesujące nas ciało porusza się do przodu, nie interesujące do tyłu. Nie ma żadnego twierdzenia, które powiedziałoby, że zasadzie zachowania podlega tylko to, co nas interesuje: zawsze liczy się wszystko.

Poszukiwanie praw fizyki przypomina układanie układanki. Mamy mnóstwo różnych kawałków. W naszych czasach ich liczba bardzo szybko wzrasta. Wiele z nich nie pasuje do pozostałych. Skąd wiadomo, że powinny utworzyć jeden obraz? Skąd wiemy, że istotnie stanowią jeden komplet? Nie jesteśmy tego pewni, co nieco nas niepokoi, ale źródłem nadziei

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
jest dla nas fakt, że kawałki mają wiele wspólnych cech. Na  
wszystkich widać niebieskie niebo i wszystkie są zrobione  
z tektury tego samego gatunku. wszystkie prawa fizyki są  
zgodne z tymi samymi zasadami zachowania.

### Symetria praw fizycznych

Wydaje się, że symetria jest dla ludzkiego umysłu czymś nie-  
zwykle fascynującym. Lubimy przyglądać się symetrycznym  
obiektom naturalnym, takim jak idealnie okrągłe planety  
i słońce, symetrycznym kryształom, takim jak płatki śniegu,  
lub niemal symetrycznym kwiatom. Nie chcę tu jednak mówić  
o symetrii obiektów naturalnych, lecz o symetrii samych praw  
fizycznych. Łatwo zrozumieć, że pewien obiekt jest symetrycz-  
ny, ale jak symetryczne może być fizyczne prawo? Jest to ra-  
czej niemożliwe, lecz fizycy bardzo lubią używać zwykłych  
słów w niecodziennym sensie. W tym przypadku chodzi o in-  
tuicyjne przekonanie dotyczące praw fizycznych, które jest  
bardzo zbliżone do poczucia symetrii obiektów, przeto odpo-  
wiednią cechą tychże praw nazywa się ich symetrią. O tym za-  
mierzam teraz mówić.

Czym jest symetria? Wystarczy spojrzeć na mnie, żeby się  
przekonać, że moja prawa strona jest symetryczna w stosunku  
do lewej, przynajmniej zewnątrz. Ten flakon może mieć taką  
samą symetrię, może też mieć jeszcze inne. Jak można zdefi-  
niować symetrię? To, że moja lewa strona jest symetryczna  
względem prawej, oznacza, że gdybym zamienił je miejscami,  
wyglądałbym dokładnie tak samo. Kwadrat ma szczególną sy-  
metrię: wygląda tak samo po obrocie o 90 stopni. Profesor  
Weyl<sup>11</sup>, matematyk, podał doskonałą definicję symetrii, zgod-  
nie z którą pewien obiekt jest symetryczny, jeśli można go pod-  
dać pewnemu przekształceniu, i po zakończeniu tej operacji  
wygląda on dokładnie tak samo jak przedtem. W tym sensie  
mówimy, że prawa fizyczne są symetryczne. Możemy je pod-  
n Hennann Weyl (1885-1955) - niemiecki matematyk.

### 92 Charakter praw fizycznych

dać pewnym przekształceniom, czy też poddać przekształceniu  
ich reprezentację, i nie spowoduje to żadnych zmian. W tym  
wykładzie będę zajmował się właśnie tym aspektem praw fi-  
zycznych.

Najprostszym przykładem symetrii tego rodzaju - zoba-  
czycie, że wbrew waszym przypuszczeniom nie jest to symetria  
między stroną prawą i lewą lub coś podobnego - jest symetria  
ze względu na przesunięcia w przestrzeni (translacje). Syme-  
tria ta ma następujący sens: jeśli zbudujemy dowolny aparat  
lub przeprowadzimy dowolne doświadczenie, a następnie  
zbudujemy taki sam aparat lub przeprowadzimy takie samo  
doświadczenie w innym miejscu, to otrzymamy takie same wy-  
niki jak w oryginalnym eksperymencie. W rzeczywistości nie  
zawsze jest to prawda. Gdybym tu na przykład zbudował jakiś  
aparat i następnie przesunął go o 20 stóp (6,5 metra) w lewo,  
natrafiłbym na ścianę i pojawiłyby się pewne trudności. Okre-  
ślając operację przesunięcia, należy wziąć pod uwagę wszyst-  
ko, co ma znaczenie w danej sytuacji, tak aby przemieścić  
wszystkie istotne elementy. Na przykład jeśli w skład aparatu  
wchodzi wahadło, to po przesunięciu go o 20 000 mil w pra-  
wo aparat nie będzie działał prawidłowo, ponieważ działanie  
wahadła zależy od przyciągania grawitacyjnego. Mogę sobie  
jednak wyobrazić, że wraz z całym laboratorium przesuwam  
również Ziemię, a wtedy aparat będzie działał tak jak poprzed-  
nio. Problem polega na tym, że należy przesunąć wszystko, co  
ma znaczenie dla funkcjonowania układu. To brzmi nieco głu-  
pio, wydają się bowiem, że jeśli po przesunięciu aparatury eks-  
peryment nie wychodzi, to widocznie coś nie zostało jeszcze  
przesunięte, a zatem wiadomo, że po dostatecznie wielu pró-

bach na pewno odniesie się sukces. W rzeczywistości tak nie jest, ponieważ wcale nie wiadomo, że zwycięstwo jest zapewnione z góry. Natura wykazuje godną uwagi cechę: można zawsze przesunąć dość ciał, aby zjawisko przebiegało tak samo jak przed przesunięciem. Nie jest to puste stwierdzenie. Chciałbym pokazać na przykładzie, że tak jest naprawdę. Weźmy prawo powszechnego ciężenia, które powiada, że siła przyciągania między dwoma ciałami jest odwrotnie proporcjo-

#### Symetria praw fizycznych 93

nalna do kwadratu odległości między nimi. Przypominam, że pod działaniem siły zmienia się prędkość ciała, przy czym zmiana jest skierowana zgodnie z kierunkiem działania siły. Jeśli mamy dwa ciała, takie jak planeta i Słońce, to po przesunięciu obu ciał odległość między nimi się oczywiście nie zmieni, a zatem nie zmieni się również siła. Po przesunięciu planety i Słońce będą się poruszały dokładnie tak jak poprzednio. Takie same będą zmiany prędkości i oba ciała będą krążyły wokół siebie tak jak przedtem. To, że zgodnie z prawem siła zależy od "odległości między ciałami", a nie od jakiejś absolutnej odległości od środka wszechświata, oznacza, że prawo to jest symetryczne ze względu na przesunięcia w przestrzeni. Poznaliśmy zatem pierwszą operację symetrii: przesunięcie w przestrzeni. Następną można nazwać przesunięciem w czasie, ale lepiej powiedzieć, że opóźnienie w czasie nie gra żadnej roli. w pewnej chwili planeta zaczyna krążyć wokół Słońca; gdybyśmy mogli umieścić ją na orbicie dwie godziny później, albo dwa lata później, nadając planecie i Słońcu dokładnie taką samą prędkość, poruszałyby się one dokładnie tak samo, ponieważ prawo powszechnego ciężenia mówi o zmianach prędkości, a nie o absolutnym czasie, którego należy używać w pomiarach. w tym konkretnym przypadku nie mamy całkowitej pewności. Gdy omawiałem teorię grawitacji, wspominałem o możliwości, że stała grawitacji zależy od czasu. Gdyby tak było, przesunięcie w czasie nie byłoby operacją symetrii. Jeśli za miliard lat stała grawitacji będzie nieco mniejsza, niż jest teraz, to wtedy planeta i Słońce z naszego eksperymentu poruszać się będą nieco inaczej niż dziś. O ile obecnie wiemy, opóźnienie w czasie nie ma wpływu na ruch. Mogę mówić tylko o prawach, jakie współcześnie znamy, choć bardzo chciałbym omawiać prawa, jakie będziemy znali jutro! Wiemy, że pod pewnym względem nie jest to prawda. Jest tak dla praw fizycznych, ale jest faktem (choć mogłoby być inaczej), że wszechświat wygląda tak, jakby miał początek w określonej chwili w czasie. Od tej chwili wszechświat zaczął się rozszerzać. Można powiedzieć, że to stwierdzenie ma charakter faktu geograficznego, analogicznego do tego, że gdy

#### 94 Charakter praw fizycznych

dokonywają przesunięcia w przestrzeni, muszą przesunąć wszystko. w tym samym sensie można powiedzieć, że reguły przesunięcia w czasie są podobne i muszą dokonać przesunięcia w czasie również ekspansji wszechświata. Moglibyśmy powtórzyć analizę, biorąc pod uwagę przesunięcie w czasie początku wszechświata; ale nie możemy przecież zainicjować ekspansji wszechświata; nie kontrolujemy na tyle sytuacji i nie możemy w żaden sposób sprawdzić naszej idei doświadczalnie. Wobec tego nie można rozstrzygnąć tego problemu naukowo. Jest faktem, że warunki panujące we wszechświecie się zmieniają, galaktyki oddalają się od siebie, a zatem gdyby bohater jakiejś opowieści fantastycznonaukowej obudził się w nieznanym epoce, mógłby określić datę, mierząc odległości między galaktykami. To oznacza, że wszechświat nie będzie w przyszłości wyglądał tak samo jak obecnie. Współcześnie przyjąto oddzielać prawa fizyczne, które mówią, jak zachowują się różne układy, jeśli w chwili począt-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)

kowej znajdowały się w podanym stanie, od stwierdzenia określającego warunki początkowe wszechświata, gdyż nic o tych warunkach nie wiemy. Zazwyczaj uważa się, że prawa fizyczne różnią się od historii astronomicznej czy też kosmologicznej. Gdyby ktoś jednak zażądał, abym zdefiniowałem tę różnicę, znalazłbym się w poważnym kłopotcie. Najważniejszą cechą praw fizycznych jest ich uniwersalność, a trudno znaleźć zjawisko bardziej uniwersalne niż ekspansja mgławic. Nie widzę sposobu zdefiniowania wspomnianej różnicy. Jeśli jednak wykluczę z tych rozważań początek wszechświata i zajmę się tylko znanymi prawami, to mogę powiedzieć, że opóźnienie w czasie nie ma znaczenia dla przebiegu zjawisk. Rozważmy jeszcze inne przykłady praw symetrii. Jedną z operacji symetrii jest obrót o ustalony kąt. Jeśli w jakimś miejscu przeprowadzam eksperyment za pomocą określonej aparatury, to mogę również wziąć drugi, taki sam aparat (być może wpierw dokonując przesunięcia w przestrzeni, żeby pierwszy nie przeszkadzał), ale obrócony, tak że wszystkie osie są inaczej zorientowane, a eksperyment będzie przebiegał tak samo. Również w tym przypadku musimy obrócić wszystkie

#### Symetria praw fizycznych 95

elementy układu, które mają znaczenie. Jeśli aparatem jest zegar z wahadłem i obracamy go poziomo, to wahadło po prostu oprze się o obudowę i zegar nie będzie działał. Jeśli natomiast obrócimy również Ziemię (co dzieje się nieustannie), to zegar będzie funkcjonował poprawnie. Matematyczny opis obrotu jest dość interesujący. Aby opisać, co się dzieje podczas obrotu, używamy liczb, które określają, gdzie co się znajduje. Liczby te to tak zwane współrzędne punktu. Czasami używamy trzech liczb, które mówią, jak wysoko ponad pewną płaszczyznę znajduje się dany punkt, jak daleko z przodu lub z tyłu (wtedy używamy liczb ujemnych) oraz jak daleko w lewo lub w prawo. W przypadku obrotu interesują nas tylko dwie współrzędne, przeto nie będę zajmował się wysokością. Przyjmijmy, że współrzędna  $x$  określa odległość do przodu w stosunku do miejsca, gdzie się znajduję, a  $y$  - na lewo. Teraz mogę określić, gdzie kto stoi, podając, jak daleko jest ode mnie ku przodowi i w lewo. Mieszkańcy Nowego Jorku wiedzą, że taki system numeracji ulic świetnie się sprawdza - a raczej sprawdzał, dopóki nie zmienili nazwy Szóstej Alei! Matematyczna idea obrotu wygląda następująco. Jeśli określe położenie punktu, podając jego współrzędne  $x$  i  $y$ , a następnie ktoś inny, używając obróconego układu współrzędnych, określi położenie tego samego punktu za pomocą współrzędnych  $x'$  i  $y'$ , to łatwo dostrzec, że moja współrzędna  $x$  jest mieszaniną współrzędnych  $x'$  i  $y'$ . Przekształcenie polega na tym, że  $x$  można wyrazić w postaci kombinacji  $x'$  i  $y'$ ,  $y$  zaś - jako kombinację  $y'$  i  $x'$ . Prawa natury muszą mieć taką postać, że gdy wezmę takie kombinacje i wstawię je do równań, postać równań nie ulegnie zmianie. W ten właśnie sposób symetria przejawia się w równaniach matematycznych. Zapisujemy równania, postępując się pewnymi literami, mamy określoną regułę zastępowania współrzędnych  $x$  i  $y$  współrzędnymi  $x'$  i  $y'$ ; w efekcie postać równań się nie zmienia, tylko wszystkie litery mają primy. Obserwator w obróconym układzie stwierdzi zatem, że jego aparat działa dokładnie tak samo jak mój. Omówię jeszcze jeden, bardzo interesujący przykład symetrii. Chodzi o zagadnienie jednostajnego ruchu prostoliniowe-

#### 96 Charakter praw fizycznych

Położenie punktu  $P$  względem mnie można opisać, podając dwie liczby, współ-



rzędne  $x$  i  $y$ .  $x$  określa, jak daleko punkt  $P$  jest przedemną,  $y$  - jak daleko w lewo. Jeśli, nie zmieniając położenia, wykonuję obrót, to położenie tego samego punktu  $P$  będzie określone za pomocą dwóch nowych liczb  $x'$  i  $y'$ .

Ryc.4. 1

go. Uważa się, że prawa fizyki nie ulegają zmianie, gdy układ eksperymentalny porusza się ze stałą prędkością. Stwierdzenie to nazywamy zasadą względności. Jeśli na pokładzie statku kosmicznego poruszającego się ze stałą prędkością znajduje się taka sama aparatura doświadczalna jak w laboratorium na ziemi, to astronauta wykonujący doświadczenie otrzyma dokładnie takie same wyniki jak fizyk w laboratorium. Oczywiście, jeśli astronauta wyjrzy przez okno lub statek z czymś się zderzy, to inna sprawa, ale jeśli statek będzie się poruszał się ze stałą prędkością po linii prostej, to badacz zaobserwuje działania dokładnie takich samych praw fizycznych, jakie obowiązują w laboratorium. Skoro tak, to nie da się jednoznacznie stwierdzić, kto się porusza.

Nim pójdziemy dalej, muszę podkreślić, że we wszystkich tych operacjach symetrii nie chodzi o przekształcenie całego wszechświata! W przypadku czasu, jeśli przyjmę, że przesunięcie w czasie dotyczy całego wszechświata, to stwierdzenie

#### Symetria praw fizycznych 97

takie staje się puste. Podobnie pozbawione treści byłoby stwierdzenie, że jeśli wezmę cały wszechświat i przesunę go w przestrzeni, to będzie się on zachowywał tak samo jak przedtem. Interesujące jest to, że jeśli wezmę pewien układ doświadczalny i przesunę go w inne miejsce, uważając, aby spełnić przy tym wiele koniecznych warunków, to układ będzie działał tak samo jak przedtem. Mogę wziąć kawałek wszechświata i przesunąć go względem układu związanego z całą resztą materii, i nie spowoduje to żadnych zmian. W przypadku zasady względności oznacza to, że ktoś, kto porusza się ze stałą prędkością po linii prostej względem pozostałych gwiazd, nie widzi żadnych szczególnych zjawisk. Innymi słowy, za pomocą żadnych doświadczeń wykonywanych wewnątrz statku kosmicznego, bez wyglądania na zewnątrz, astronauta nie może stwierdzić, czy porusza się względem gwiazd stałych.

Zasadę względności pierwszy sformułował Newton. Weźmy jego prawo powszechnego ciążenia. Stwierdza ono, że siła jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między ciałami i powoduje zmianę prędkości ciał. Przypuśćmy teraz, że już obliczyłem, jak porusza się planeta wokół słońca w spoczynku, i teraz chcę wiedzieć, jak wyglądałby ruch planety wokół słońca dryfującego ze stałą prędkością. W tym przypadku wszystkie obliczone prędkości ulegają zmianie: muszę do nich dodać stałą prędkość dryfu. Jednak w prawie ruchu mowa jest o zmianach prędkości, a zatem siła działająca na planetę jest taka sama, niezależnie od tego, czy słońce spoczywa, czy dryfuje. Wobec tego zmiany prędkości są w obu przypadkach identyczne. Ostatecznie widzimy, że jeśli dodamy stałą prędkość, to prawa ruchu się nie zmieniają, a zatem badając wyłącznie Układ Słoneczny i ruch planet, nie można stwierdzić, czy słońce porusza się w przestrzeni. Zgodnie z prawami Newtona jednostajny ruch słońca nie miałby żadnego wpływu na ruch planet. Dlatego Newton stwierdził, że: "względne ruchy ciał w przestrzeni są takie same, niezależnie od tego, czy sama przestrzeń jest w spoczynku względem gwiazd stałych, czy porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym".

### 98 Charakter praw fizycznych

Od czasów Newtona odkryto wiele nowych praw fizycznych. Między innymi James Clerk Maxwell<sup>12</sup> odkrył prawa elektromagnetyzmu. Z równań Maxwella wynika między innymi, że powinny istnieć fale elektromagnetyczne - na przykład światło - które rozchodzą się z prędkością 186 000 mil na sekundę (300 000 kilometrów na sekundę) i koniec. Prędkość światła wynosi 186 000 mil na sekundę, niezależnie od wszystkich okoliczności. Skoro tak, to można łatwo określić, który układ pozostaje w spoczynku, ponieważ prawo stwierdzające, że światło rozchodzi się z prędkością 186 000 mil na sekundę, z pewnością (na pierwszy rzut oka) nie pozwala, by obserwator się poruszał, nie dostrzegając przy tym żadnych tego efektów. Przypuśćmy, że astronauta znajduje się w statku poruszającym się w pewnym kierunku z prędkością 100 000 mil na sekundę, a ja pozostaję w spoczynku. Jeśli wystrzelę w jego kierunku wiązkę światła, która przejdzie przez okno statku, to jest oczywiste, nieprawdaż, że skoro statek porusza się z prędkością 100 000 mil na sekundę, a światło z prędkością 186 000 mil na sekundę, to astronauta stwierdzi, że światło porusza się względem statku z prędkością tylko 86 000 mil na sekundę. W rzeczywistości okazuje się jednak, że zmierzona przez astronautę prędkość światła wynosi 186 000 mil na sekundę względem statku, choć ja uważam, że światło rozchodzi się z taką prędkością względem mnie! Nie jest łatwo to zrozumieć. Ten wynik jest w tak oczywisty sposób sprzeczny z intuicją, że wielu ludzi do dziś nie może w to uwierzyć. Jednak eksperymenty wielokrotnie potwierdzały, że prędkość światła zawsze wynosi 186 000 mil na sekundę, niezależnie od prędkości ruchu obserwatora. Pytanie, jak to możliwe? Einstein i Poincare<sup>13</sup> pierwsi zrozumieli, że dwaj poruszający się względem siebie obserwatorzy mogą zmierzyć taką samą prędkość światła tylko wtedy, jeśli różnią się poczuciem przestrzeni i czasu. Oznacza to, że zegar w poruszającym się 12 James Clerk Maxwell (1831-1879) - pierwszy profesor fizyki eksperymentalnej w Cambridge.  
13 Jules Henn Poincare (1854-1912) - francuski uczony.

### Symetria praw fizycznych 99

A

Λ

f\

t^

Λ

•a

S

f\

Λ

"-Λ     Λ

Λ0Λ'

Λ\_a

fotografia w chwili.,

gdy zachodzą zdarzenia

Ryc. 4.2

położenia w chwili, gdy widzisz zdarzenia się statku kosmicznym tyka z inną szybkością niż w laboratorium. Moglibyście zatem powiedzieć, że wystarczy, by astronauta spojrzeć na zegar umieszczony na statku kosmicznym i przekonać się, że się późni. Ale to nieprawda, bo wtedy mógłby astronauta również działa wolniej! Jeśli zatem cała aparatura na statku działa poprawnie, to astronauta stwierdza, że światło rozchodzi się z prędkością 186 000 astronautycznych mil na astronautyczną sekundę, podczas gdy ja uważam, że prędkość światła wynosi 186 000 laboratoryjnych mil na laboratoryjną sekundę. Takie przekształcenie jest czymś niezwykłym, ale - jak się okazuje - w pełni uzasadnionym. Wspomniałem już, że z zasady względności wynika, iż nie można wyznaczyć prędkości ruchu jednostajnego prostoliniowego. W poprzednim wykładzie omawialiśmy przykład dwóch samochodów A i B (ryc. 4.2). Na końcach samochodu B następują pewne zdarzenia x i y. Obserwator stojący pośrodku samochodu twierdzi, że zdarzenia te nastąpiły równocześnie, ponieważ w tym samym momencie dostrzegł błyski światła towarzyszące obu zdarzeniom. Natomiast obserwator w samochodzie A, który porusza się ze stałą prędkością względem B, dostrzegł zdarzenie wcześniej niż zdarzenie y. Światło z x dotarło do obserwatora wcześniej, ponieważ porusza się on do przodu. Z zasady symetrii ze względu na ruch ze stałą prędkością po linii prostej wynika, że gdy mówię, co się dzieje na świecie "teraz", stwierdzenie to nie ma sensu. Słowo "symetria" oznacza, że nie można stwierdzić, który obserwator ma

#### 100 Charakter praw fizycznych

rację. Jeśli ktoś porusza się ze stałą prędkością względem mnie, to zdarzenia, które on uważa za równoczesne, moim zdaniem równoczesne nie są, nawet jeśli mijamy się w chwili, kiedy według mnie nastąpiło zdarzenie równoczesne. Nie możemy uzgodnić, co oznacza "teraz" dla zdarzeń odległych. Prowadzi to do wniosku, że utrzymanie zasady względności, która stwierdza, że nie można wykryć ruchu jednostajnego prostoliniowego, wymaga radykalnej zmiany naszych wyobrażeń o przestrzeni i czasie. Dwa zdarzenia, które zdaniem jednego obserwatora są równoczesne, oglądane z poruszającego się układu, równoczesne bynajmniej nie są, jeśli nie zachodzą w tym samym miejscu.

Jak łatwo się przekonać, bardzo to przypomina zmiany współrzędnych  $x$  i  $y$  podczas obrotu. Jeśli stoję twarzą do moich słuchaczy, to obie strony sceny położone są równo ze mną, mają zatem różne  $y$ , ale to samo  $x$ . Jeśli obrócę się o 90 stopni, jedna strona sceny znajdzie się przede mną, druga za mną, będą miały zatem różne  $x$ '. Tak samo jest ze zdarzeniami. Z jednego punktu widzenia zachodzą one równocześnie (ta sama współrzędna  $x$ ), ale z innego mogą zachodzić nierównocześnie (różne współrzędne  $t'$ ). Mamy tu do czynienia z uogólnieniem koncepcji obrotu w dwóch wymiarach, tak by obejmowała ona obroty w przestrzeni i czasie. Czas wraz z przestrzenią tworzy jeden, czterowymiarowy świat. Nie jest to tylko sztuczne połączenie dwóch niezależnych wielkości, choć tak to właśnie tłumaczą autorzy większości popularnych książek, twierdząc, że "dodajemy czas do przestrzeni, ponieważ nie wystarczy określić położenia punktu, należy jeszcze powiedzieć, kiedy nastąpiło takie a takie zdarzenie". To prawda, ale to jeszcze nie oznacza, że mamy do czynienia z rzeczywistą czasoprzestrzenią czterowymiarową, a nie tylko kombinacją niezależnych wielkości. Trójwymiarowa przestrzeń ma szczególną cechę, niezależną od punktu widzenia: w zależności od wyboru układu współrzędnych, współrzędna "przód-tył" może się w niej mieszać ze współrzędną "w lewo-w prawo". Podobnie w przypadku czasoprzestrzeni współrzędna "przeszłość-przyszłość" miesza się ze współrzędnymi prze-

### Symetria praw fizycznych 101

strzennymi. Dlatego przestrzeń i czas są ze sobą nierozdzielnie połączone. Wkrótce po tym odkryciu Minkowski powiedział, że: "Od tej chwili przestrzeń i czas rozważane każde oddzielnie są skazane na odejście w cień, a przetrwa tylko połączenie tych dwóch wielkości".

Omawiam ten przykład tak szczegółowo, ponieważ w istocie od niego rozpoczęła się analiza symetrii praw fizycznych. To Poincaré zasugerował, że należy badać przekształcenia równań, które nie zmieniają ich postaci. Poincaré zwracał uwagę na symetrie praw fizycznych. Takie symetrie, jak przesunięcie w przestrzeni i czasie, nie mają szczególnie głębokiego charakteru, natomiast symetria ze względu na przejście do układu poruszającego się ze stałą prędkością względną jest niezwykle interesująca i ma poważne konsekwencje. Ponadto wnioski wypływające z takiej symetrii dotyczą również praw, których jeszcze nie znamy. Na przykład jeśli zasada względności obowiązuje również w rozpadzie mionu, to z tego wynika, że obserwując taki rozpad, nie można stwierdzić, z jaką prędkością porusza się statek kosmiczny. Oznacza to, że wiemy coś o rozpadzie mionu, choć nie wiemy, dlaczego mion się rozpada.

Istnieją jeszcze symetrie o zupełnie innym charakterze.

Zgodnie z jedną z nich, dowolny atom można zastąpić innym atomem tego samego rodzaju i to nie wpłynie na przebieg zjawisk. Co to znaczy "atom takiego samego rodzaju"? Mogę tylko odpowiedzieć: to taki atom, że jeśli zastąpimy nim atom oryginalny, nie wpłynie to na przebieg zjawisk! Wygląda na to, że fizycy zawsze mówią bez sensu, prawda? Istnieje wiele rodzajów atomów. Gdy zastąpimy atom jednego rodzaju atomem innego rodzaju, spowoduje to pewne zmiany, ale jeśli zastąpimy atom atomem tego samego rodzaju, to nic się nie zmieni. Czy mamy do czynienia z błędnym kołem? W rzeczywistości chodzi o to, że naprawdę istnieją atomy "tego samego rodzaju", że można określić klasę takich atomów i że jeśli zastąpimy jeden atom innym atomem z tej samej klasy, to nie dojdzie do żadnych zmian. Ponieważ liczba atomów w niewielkim kawałku materii jest rzędu jednej dziesiątej kwadrylionu

### 102 Charakter praw fizycznych

(10 z 23 zerami), dobrze wiedzieć, że wszystkie są takie same, a nie każdy inny. To naprawdę bardzo interesujące, że wszystkie atomy można podzielić na kilkaset różnych typów; stwierdzenie, które za tym idzie, że jeden atom można zastąpić innym tego samego rodzaju, ma bardzo duże znaczenie. To jedna z najważniejszych zasad mechaniki kwantowej, mająca niezwykle liczne konsekwencje. Nie mogę jej tu jednak wyjaśnić, częściowo dlatego, ale tylko częściowo, że wykłady te są przeznaczone dla słuchaczy nie znających matematyki. Zasada ta jest jednak bardzo subtelna. Stwierdzenie, że można zastąpić jeden atom innym tego samego rodzaju, prowadzi w mechanice kwantowej do bardzo wielu cudownych zjawisk. Dzięki temu istnieje nadciężki hel, ciecz, która przepływa przez rurki, nie napotykając żadnego oporu, po prostu może płynąć dowolnie długo. Dzięki zasadzie nieodróżnialności atomów istnieją pierwiastki tworzące układ okresowy. Ta sama zasada sprawia, że istnieje siła, dzięki której podłoga nie rozpada się pod moim ciężarem. Nie mogę tego szczegółowo wyjaśnić, ale chciałbym podkreślić, że takie zasady mają bardzo duże znaczenie.

Teraz już pewnie wszyscy jesteście przekonani, że prawa fizyczne są symetryczne ze względu na wszystkie możliwe przekształcenia. Mogę więc podać kilka przykładów operacji, które właśnie nie działają. Pierwszą taką operacją jest zmiana skali. Nie jest prawdą, że jeśli wybudujemy kopię działającego aparatu, składającą się dokładnie z takich samych części, wy-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
konanych z takiego samego materiału, lecz dwa razy więk-  
szych, to nowy aparat będzie działał tak samo jak stary. Ci,  
którzy słyszeli o atomach, dobrze o tym wiedzą. Gdybym  
spróbował zrobić 10 miliardów razy mniejszą kopię aparatu,  
składałby się on z pięciu atomów, a przecież nie można, na  
przykład, obrabiać maszynowo takich małych części. Jest ab-  
solutnie oczywiste, że jeśli pójdziemy tak daleko, to nie może-  
my swobodnie zmieniać skali, ale jeszcze przed powstaniem  
nowoczesnej teorii atomowej było jasne, że wybór skali ma  
znaczenie. Zapewne wszyscy czytali kiedyś w gazecie, że ktoś  
zrobił model gotyckiej katedry z zapałek - wiele pięter, wieże  
i całość bardziej gotycka niż jakakolwiek rzeczywista gotycka

### Symetria praw fizycznych 103

katedra. Dlaczego nikt nigdy nie zrobił takiej katedry natural-  
nych rozmiarów z wielkich belek, z takimi samymi komplika-  
cjami i ozdobami? Odpowiedź brzmi, że taka budowla runęła-  
by pod własnym ciężarem. Ach, to dlatego, że zapomnieliśmy  
zmienić wszystkie elementy, które mają znaczenie dla sytuacji.  
Dobrze. Na małą katedrę z zapałek działa siła ciężenia, a za-  
tem przed porównaniem małej katedry z dużą musimy rów-  
nież odpowiednio powiększyć Ziemię. Fatalna sprawa. Po-  
większenie Ziemi spowoduje zwiększenie siły przyciągania  
i belki katedry połamają się już na pewno.

To Galileusz pierwszy zwrócił uwagę na fakt, że prawa fi-  
zyczne zależą od skali. Omawiając wytrzymałość belek i kości,  
Galileusz zwrócił uwagę, że kość większego zwierzęcia, po-  
więdźmy dwa razy wyższego i grubszego, które waży zatem  
osiem razy więcej, musi mieć osiem razy większą wytrzyma-  
łość. Ale wytrzymałość kości zależy od pola przekroju po-  
przecznego, a zatem dwa razy większa kość ma tylko cztery ra-  
zy większą wytrzymałość, może podtrzymać jedynie cztery  
razy większy ciężar. W książce Galileusza Rozmowy i dowodze-  
nia matematyczne z zakresu dwóch nowych umiejętności moż-  
na zobaczyć rysunki kości gigantycznych psów. Najwyraźniej  
zdaniem Galileusza odkrycie faktu, że prawa fizyki zależą od  
wyboru skali, było równie ważne, jak odkrycie praw ruchu  
i właśnie dlatego omówił je on w swoich Rozmowach.

Innym przykładem zmiany, która nie jest przekształceniem  
symetrii, jest ruch wirowy statku kosmicznego ze stałą pręd-  
kością kątową. W takim przypadku ruch można wykryć. Astro-  
nautom może zakreślić się w głowach. Są jeszcze inne efekty,  
jak siła odśrodkowa, która odrzuca różne obiekty na ściany  
statku (czy jak kto chciałby to opisać - mam nadzieję, że na  
sali nie ma nauczycieli fizyki, którzy chcieliby mnie popra-  
wić!). Ruch wirowy Ziemi można wykryć za pomocą wahadła  
lub żyroskopu. Jak pewnie wszyscy wiedzą, w wielu obserwa-  
toriach i muzeach techniki można zobaczyć tak zwane waha-  
dło Foucault<sup>14</sup>, które pozwala bez konieczności obserwacji  
14 Jean Bernard L'ŕon Foucault (1819-1868) - francuski fizyk.

### 104 Charakter praw fizycznych

gwiazd dowieść, że Ziemia się obraca. Możemy stwierdzić, że  
tu na Ziemi poruszamy się ruchem obrotowym ze stałą pręd-  
kością kątową, ponieważ taki ruch powoduje zmianę praw  
fizycznych.

Wielu uczonych argumentowało, że ruch obrotowy Ziemi  
jest określony względem galaktyk i gdyby galaktyki obracały  
się wraz z Ziemią, nie widzielibyśmy żadnych zmian. Nie  
wiem, co by się stało, gdybyśmy mogli spowodować obrót ca-  
łego wszechświata, i w tej chwili nie potrafimy odpowiedzieć  
na takie pytanie. Nie znamy również żadnej teorii, opisującej  
wpływ galaktyk na ciała na Ziemi, z której wynikałoby bez żad-  
nych kantów, że takie zjawiska, jak to, że ruch obrotowy powo-  
duje wystąpienie siły bezwładności, a woda w obracającym się  
wiadrze tworzy wklęsłą powierzchnię, są konsekwencją od-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
działywania z otaczającą nas materią. Hipoteza ta, znana jako zasada Macha, jak dotychczas nie została wykazana. Łatwiej doświadczalnie odpowiedzieć na pytanie, czy ruch obrotowy ze stałą prędkością kątową względem mgławic powoduje jakieś obserwowalne efekty. Tutaj odpowiedź brzmi "tak". Jeśli natomiast poruszamy się ze stałą prędkością po linii prostej względem mgławic, to czy spostrzegamy skutki również tego? Odpowiedź brzmi "nie". Są to dwie różne sprawy. Nie możemy twierdzić, że ruch jest zawsze względny. Wcale to nie wynika z teorii względności. Zasada względności mówi tylko, że nieobserwowalny jest jednostajny ruch prostoliniowy względem mgławic.  
Bardzo interesująca jest kolejna zasada symetrii, którą chciałbym omówić. Chodzi mi o odbicie, czyli inwersję przestrzeni. Buduję pewien aparat, powiedzmy zegar, a następnie w niewielkiej odległości buduję drugi, stanowiący lustrzane odbicie tamtego. Oba pasują do siebie jak dwie rękawiczki, lewa i prawa. Jeśli w jednym sprężyna jest skrzyta w prawo, to w drugim w lewo. Nakręcam oba zegary, nastawiam je na tę samą godzinę i uruchamiam. Czy oba zegary będą zawsze wskazywać tę samą godzinę? Czy dwa mechanizmy, stanowiące swoje lustrzane odbicie, działają tak samo? Nie wiem, jak sądzicie, ale większość ludzi przypuszcza, że tak. Oczywiście,

#### Symetria praw fizycznych 105

nie mówimy tu o geografii. Możemy łatwo odróżnić prawą i lewą stronę na podstawie cech geograficznych. Możemy powiedzieć, że jeśli ktoś stoi na plaży na Florydzie zwrócony twarzą w stronę Nowego Jorku, to ma ocean po prawej stronie. Gdyby działanie naszego zegara wymagało wody morskiej, zegar z lewej strony nie mógłby działać, ponieważ jego mechanizm nie sięgałby morza. W takim przypadku musielibyśmy sobie wyobrazić, że operacji inwersji podlegają również cechy geograficzne. Jak wiemy, wykonując przekształcenie symetrii, należy wziąć pod uwagę wszystkie elementy mające wpływ na sytuację. Nie mówimy tu również o historii. Jeśli w warsztacie wybierzemy na chybił trafił jakąś śrubę, to mamy duże szanse, że będzie to śruba prawoskrętna. Można powiedzieć, że drugi zegar różni się od oryginalnego, ponieważ trudniej dostać śruby pasujące do jego mechanizmu. Tu jednak chodzi wyłącznie o umowę, jaki gwint stosujemy w każdym razie na pierwszy rzut oka wydaje się, że inwersja jest operacją symetrii. Okazuje się, że prawa grawitacji są takie, że jeśli na nich opiera się funkcjonowanie zegara, to lustrzane odbicie nie powoduje żadnych zmian w jego działaniu. Podobnie prawa elektryczności i magnetyzmu gwarantują, że jeśli zegar zawiera jakieś części elektryczne, to jego lustrzane odbicie działa tak samo jak pierwowzór. Również nie ma znaczenia, czy w mechanizmie zegara odgrywają rolę silne oddziaływania jądrowe. Jednak coś może spowodować, że te dwa zegary będą działały inaczej! Za chwilę właśnie będę o tym mówił.  
Być może wiecie, że można zmierzyć stężenie cukru w wodzie, przepuszczając przez roztwór spolaryzowane światło. Wiązka światła pada na polaryzator liniowy, który przepuszcza tylko światło o określonej polaryzacji, a następnie przechodzi przez roztwór cukru. Polaryzację światła można zmierzyć za pomocą kolejnego polaryzatora. Można się przekonać, że im grubsza jest warstwa roztworu, tym bardziej trzeba skrócić polaryzator w prawo, aby światło mogło się przez niego przedostać. Jeśli przepuścimy wiązkę światła przez roztwór w drugą stronę, płaszczyzna polaryzacji również ulegnie skręceniu w prawo. W ten sposób możemy odróżnić lewą i prawą

#### 106 Charakter praw fizycznych

stronę. Możemy wykorzystać roztwór cukru i światło w naszych zegarach. Powiedzmy, że mamy zbiornik z roztworem

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
i przepuszczamy przez niego światło, a drugi polaryzator jest tak ustawiony, aby to światło mogło się przedostać. Przypuścimy teraz, że w drugim zegarze znajduje się układ będący lustrzanym odbiciem pierwszego układu, ponieważ oczekujemy, że płaszczyzna polaryzacji światła zostanie skrzyżowana w lewo. Jednak w rzeczywistości płaszczyzna polaryzacji ulegnie skrzyżowaniu w prawo i światło nie przedostanie się przez drugi polaryzator. Jeśli zastosujemy wodny roztwór cukru i światło, będziemy w stanie rozróżnić nasze zegary!  
To bardzo interesujący fakt. Na pierwszy rzut oka wydaje się, że dowodzi on, iż prawa fizyczne nie są symetryczne ze względu na inwersję przestrzeni. Jednak cukier użyty w naszych doświadczeniach pochodził zapewne z buraków cukrowych. Częsteczki cukru są stosunkowo proste; cukier można wytwarzać w laboratorium z dwutlenku węgla i wody, choć wymaga to wielu reakcji. Sztuczny cukier jest chemicznie nieodróżnialny od naturalnego, ale jego roztwór nie powoduje skrzyżowania płaszczyzny polaryzacji światła. Pewne bakterie zjadają cukier. Jeśli do roztworu dodamy takie bakterie, to zjedzą one tylko połowę cukru, a roztwór, który pozostanie, spowoduje skrzyżowanie płaszczyzny polaryzacji w lewo. Można to wyjaśnić następująco. Częsteczka cukru składa się z wielu atomów, tworzących pewną strukturę. Jeśli skonstruujemy częsteczkę, której struktura stanowi zwierciadlane odbicie oryginalnej, to wszystkie odległości międzyatomowe i poziomy energii będą dokładnie takie same, a zatem częsteczka zachowuje się identycznie we wszystkich reakcjach chemicznych, z wyjątkiem tych, które zachodzą w organizmach ożywionych. Żywe stworzenia dostrzegają jakoś tę różnicę. Bakterie zjadają tylko cukier jednego rodzaju. W skład cukru otrzymanego z buraków wchodzi tylko częsteczki prawoskrętne, a zatem jego roztwór powoduje skrzyżowanie płaszczyzny polaryzacji w prawo. Bakterie zjadają tylko cukier prawoskrętny. Gdy wytwarzamy cukier z prostych substancji, których częsteczki nie są asymetryczne, wówczas powstają częsteczki cukru obu ro-

#### Symetria praw fizycznych 107

dzajów. Jeśli do roztworu sztucznego cukru wprowadzimy bakterie, zjedzą one wszystkie częsteczki prawoskrętne i w roztworze pozostaną tylko częsteczki lewoskrętne. Jak stwierdził Pasteur<sup>15</sup>, można oddzielić od siebie częsteczki obu rodzajów, badając kryształki cukru przez mikroskop. To wszystko dobrze do siebie pasuje i potrafimy rozdzielić oba rodzaje cukru nie czekając, aż bakterie zrobią to za nas. Interesujące jest natomiast, że bakterie potrafią robić takie rzeczy. Czy to oznacza, że żywe organizmy nie podlegają ogólnym prawom fizycznym? Najwyraźniej nie. Wydaje się, że w żywych organizmach występuje wiele, bardzo wiele cząsteczek mających określoną skrętność. Do typowych cząsteczek obecnych w organizmach należą białka, mające postać prawoskrętnego korkociągu. O ile wiemy, gdybyśmy potrafili wytworzyć chemicznie takie cząsteczki, ale skrzyżowane w lewo, nie mogłyby one spełniać swojej funkcji w organizmach biologicznych, ponieważ nie pasowałyby do innych białek. Lewoskrętne cząsteczka pasowałaby do lewoskrętnej, lecz dwie cząsteczki skrzyżowane w przeciwnych kierunkach nie mogą współdziałać. Bakteria zawierająca w swoich chemicznych wnętrznościach prawoskrętne cząsteczki potrafi odróżnić cukier prawoskrętny od lewoskrętnego.

Jak do tego doszło, że bakterie zawierają cząsteczki prawoskrętne? Procesy chemiczne i fizyczne nie wyróżniają pewnych cząsteczek, a zatem powstaje w nich tyle samo cząsteczek obu rodzajów. Inaczej jest w procesach biologicznych. Można łatwo uwierzyć, że kiedyś, bardzo dawno temu, gdy zaczynały się procesy prowadzące do powstania żywych organizmów, pewna przypadkowo wybrana cząsteczka zaczęła się reprodukować, aż wreszcie powstały te zabawne stwory, z wystającymi

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
kończynami zaopatrzonymi w palce, nieustannie wykrzykują-  
ce coś do siebie... Jesteśmy tylko potomkami kilku pierwszych  
cząsteczek i to przypadek sprawił, że te cząsteczki były akurat  
prawoskrętne. Musiały być albo prawoskrętne, albo lewoskręt-  
ne, po czym zaczęły się rozmnażać i było ich coraz więcej.  
15 Louis Pasteur (1822-1895) - francuski bakteriolog.

#### 108 Charakter praw fizycznych

Przypomina to nieco śruby w warsztacie. Używamy prawo-  
skrętnych śrub do wytwarzania prawoskrętnych śrub, i tak to  
się ciągnie. Fakt, że wszystkie cząsteczki we wszystkich organi-  
zmach mają taką samą skrętność, jest zapewne najlepszym  
dowodem jednorodności wszystkich organizmów znanych  
w historii życia, poczynając od poziomu molekularnego.  
Aby lepiej zrozumieć problem, czy prawa fizyki nie zmie-  
niają się wskutek zwierciadlanego odbicia, możemy sformuło-  
wać to pytanie w następujący sposób. Przypuśćmy, że nawią-  
zaliśmy łączność z mieszkańcem Marsa lub Arktura i chcemy  
mu opisać, jak wyglądają różne rzeczy na Ziemi. Przede-  
wszystkim, w jaki sposób może on zrozumieć nasze słowa?  
Nad tym problemem zastanawiał się profesor Morrison<sup>16</sup>  
z Uniwersytetu Cornella, który wskazał, że moglibyśmy zacząć  
mówiąc: "tik, jeden, tik, tik, dwa, tik, tik, tik, trzy" i tak dalej.  
Wkrótce nasz partner poznałby liczby. Następnie moglibyśmy  
przekazać serię liczb wyrażających względne masy atomowe  
pierwiastków, po czym powtórzyć listę, wymieniając ich na-  
zwy, na przykład "wodór 1,008", potem deuter, hel i tak dalej.  
Marsjanin pomyślałby trochę nad tą listą, odkryłby niewątpli-  
wie, że są to masy atomowe pierwiastków, a zatem te słowa to  
z pewnością ich nazwy. W ten sposób stopniowo można by  
rozbudować wspólny język. No ale pojawia się następny pro-  
blem. Przypuśćmy, że gdy już się dobrze poznamy, Marsjanin  
zada nam pytanie: "Słuchaj, stary, jesteś bardzo sympatyczny,  
ale chciałbym wiedzieć, jak wyglądasz". Zaczynamy zatem  
opowiadać o sobie: "Mamy około sześciu stóp wzrostu".  
"Sześć stóp - przerywa tamten. - Jak długa jest stopa?" Od-  
powiedź jest łatwa. "Sześć stóp to długość mniej więcej sie-  
demnaście miliardów razy większa niż średnica atomu wodo-  
ru". To nie żart - w ten sposób można wytłumaczyć komuś,  
kto nie zna żadnej naszej miary i komu nie możemy przesłać  
żadnych próbek, ile to jest sześć stóp. Jeśli chcemy poinformo-  
wać Marsjanina, ile mamy wzrostu, możemy to zrobić. Jest  
16 Philip Morrison, amerykański fizyk, 1964, BBC-1, serial telewizyjny  
The Fabric of the Atom.

#### Symetria praw fizycznych 109

tak dlatego, że prawa fizyczne zależą od wyboru skali, co moż-  
na wykorzystać do jej określenia. Możemy zatem opisać nasz  
wygląd zewnętrzny: z obu stron mamy ręce, nogi i tak dalej,  
wyglądamy tak a tak i tak dalej. Na to Marsjanin odpowiada:  
"To bardzo interesujące, ale jak wyglądacie w środku?". Opi-  
sujemy mu teraz serce i inne organy, po czym mówimy: "Ser-  
ce znajduje się z lewej strony". No tak, ale jak można mu wy-  
tłumaczyć, co to znaczy lewa strona? "Och - mówicie. -  
Bierzemy cukier z buraków, rozpuszczamy go w wodzie i prze-  
puszczamy przez roztwór spolaryzowane światło..." Problem  
polega na tym, że na Marsie nie ma buraków cukrowych.  
A gdyby nawet były, jeśli nawet wskutek przypadkowych wyda-  
rzeń ewolucyjnych powstałyby na Marsie takie same białka jak  
na Ziemi, nie mielibyśmy żadnego sposobu, aby się dowie-  
dzieć, czy mają one taką samą skrętność. Nie można tego  
sprawdzić. Po przemyśleniu sprawy dochodzimy do wniosku,  
że całe przedsięwzięcie jest niemożliwe.  
Jednak mniej więcej pięć lat temu pewne doświadczenia  
w dziedzinie cząstek elementarnych dały bardzo zagadkowe  
wyniki. Nie będę tu wchodził w szczegóły, ale popadaliśmy



Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
w coraz większe trudności, nie mogliśmy sobie dać rady z kolejnymi paradoksami, aż wreszcie Lee i Yang<sup>17</sup> wysunęli hipotezę, że może zasada symetrii ze względu na lustrzane odbicie nie obowiązuje w słabych oddziaływaniach. To - jak twierdzili - pozwoliłoby wyjaśnić wiele zagadek. Lee i Yang zaproponowali przeprowadzenie kilku doświadczeń, które pozwoliłyby bezpośrednio sprawdzić ich hipotezę. Opiszę tutaj krótko najprostsze z tych doświadczeń.  
Rozważmy rozpad promieniotwórczy, w którym następuje emisja elektronu i neutrina. Niechaj to będzie rozpad neutronu, o którym już mówiłem, na proton, elektron i antyneutrino. Istnieje wiele izotopów promieniotwórczych rozpadających się w ten sposób, że ładunek jądra wzrasta o jeden i wyemitowany zostaje elektron. Jeśli teraz zmierzymy spin elektronu, prze-  
17 Tsung Dao Lee i Chen Ning Yang - chińscy fizycy, laureaci Nagrody Nobla w 1957 roku.

#### 110 Charakter praw fizycznych

konamy się, że wiruje on w lewo (gdy patrzymy od tyłu, na przykład, jeśli elektron leci na południe, wiruje tak samo jak Ziemia). Fakt, że elektron emitowany podczas rozpadu zawsze wiruje w lewo, ma obiektywne znaczenie. To tak, jakby elektrony były wyrzucane z nagwintowanej lufy. Lufa może być nagwintowana na dwa sposoby: prawo- albo lewoskrętnie. Z doświadczenia wynika, że elektron wiruje tak, jakby wylatywał z lufy nagwintowanej lewoskrętnie. Moglibyśmy zadzwonić do znajomego Marsjanina i powiedzieć: "weź izotop promieniotwórczy i przyjrzyj się elektronom emitowanym podczas rozpadów beta. Jeśli spojrzysz z boku na lecący w górę elektron, to strzałka wskazująca kierunek wirowania będzie zwrócona ku tobie po lewej stronie. To ci wyjaśni, co znaczy lewa strona. Serce człowieka znajduje się po lewej stronie". Można zatem obiektywnie odróżnić stronę lewą od prawej. Zasada symetrii zwierciadlanej okazała się fałszywa.  
Chciałbym teraz omówić związek między zasadami zachowania i prawami symetrii. W poprzednim wykładzie mówiłem o zasadach zachowania energii, pędu, momentu pędu i tak dalej. Jest niezwykle interesujące, że istnieje bardzo głęboki związek między zasadami zachowania i prawami symetrii. Właściwe przedstawienie tego związku wymaga znajomości mechaniki kwantowej, ale mimo to postaram się wyjaśnić, o co chodzi w jednym przynajmniej przypadku.  
Założmy, że prawa fizyczne można wyrazić w postaci zasady wariacyjnej. To pozwoli udowodnić, że jeśli wolno przesunąć aparaturę w przestrzeni, czyli jeśli translacja w przestrzeni jest operacją symetrii, to musi być spełniona zasada zachowania pędu. Istnieje głęboki związek między regułami symetrii i zasadami zachowania, ale wymaga on przyjęcia założenia, że można sformułować odpowiednią zasadę wariacyjną. W drugim wykładzie omówiłem pewien sposób wyrażania fizycznych praw, który polega na stwierdzeniu, że cząstka porusza się między dwoma zadanymi punktami w zadanym czasie, "wypróbowując" wszystkie możliwe trajektorie. Istnieje pewna wielkość fizyczna, zwana - co może być przyczyną nieporozumień - działaniem. Gdy obliczamy działanie dla róż-

#### Symetria praw fizycznych 111

nych trajektorii, przekonujemy się, że osiąga ono minimum dla rzeczywistej trajektorii cząstki. Zasada wariacyjna stwierdza właśnie, że cząstki poruszają się po takiej drodze, aby zminimalizować wartość działania. Możemy to wyrazić inaczej, że jeśli pewna wielkość, która zależy od drogi, ma dla tej drogi wartość minimalną, to gdy nieco zmienimy drogę, nie spowoduje to zmiany owej wielkości. Przypuśćmy, że podczas wycieczki w górach - ale górach łagodnych, ponieważ analogiczne wielkości matematyczne są gładkie - dochodzimy do dna

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)

doliny. Twierdzą, że jeśli teraz wykonamy mały krok naprzód, to wysokość się nie zmieni. Gdy jesteśmy w najniższym lub najwyższym punkcie, mały krok w dowolnym kierunku w pierwszym przybliżeniu nie powoduje zmiany wysokości, natomiast gdy idziemy po zboczu, krok w dół powoduje utratę wysokości, a krok w górę jej zwiększenie. To ma zasadnicze znaczenie dla dowodu, dlaczego odejście o mały krok od najniższego punktu nie ma znaczenia. Gdyby było inaczej, robiąc krok w przeciwnym kierunku, trafilibyśmy do punktu jeszcze niższego. To jest jednak niemożliwe, ponieważ już jesteśmy w najniższym punkcie, a zatem musimy przyjąć, że w pierwszym przybliżeniu mały krok nie powoduje zmiany wysokości. Wiemy zatem, że niewielka zmiana drogi w pierwszym przybliżeniu nie powoduje zmiany działania. Narysujmy drogę, po której porusza się cząstka między punktami A i B (ryc. 4.3) i wyobraźmy sobie inną drogę. Wpierw cząstka przeskakuje do pobliskiego punktu C, później porusza się do punktu D wzdłuż drogi otrzymanej przez przesunięcie równoległe drogi AB, a na koniec przeskakuje do B. Odległość BD jest taka sama jak AC. Wiemy już, że prawa fizyki gwarantują, iż całkowite działanie obliczone wzdłuż drogi ACDB jest, w pierwszym przybliżeniu, takie samo jak dla drogi AB. To wynika z zasady wariacyjnej - jeśli AB to rzeczywista droga. Co więcej, jeśli wskutek translacji w przestrzeni świat się nie zmienia, to działanie obliczone dla oryginalnej drogi AB jest takie samo jak dla drogi CD, gdyż tę drogę otrzymaliśmy właśnie za pomocą translacji. Jeśli zatem spełnione jest prawo symetrii ze względu na translację w przestrzeni, to działanie wzdłuż drogi

## 112 Charakter praw fizycznych

### Ryc. 4.3

AB jest takie samo jak wzdłuż CD. Jednak dla ruchu rzeczywistego działanie dla drogi ACDB jest niemal takie samo jak dla drogi AB, a zatem również niemal takie samo jak dla drogi CD. Działanie jest sumą trzech części: liczymy je oddzielnie dla odcinków AC, CD i DB. Jeśli teraz wykonamy proste odejmowanie, to przekonamy się, że wkłady do działania ze strony dróg AC i DB muszą się wzajemnie kasować. Jednak wzdłuż tych odcinków cząstka porusza się w przeciwnych kierunkach. Jeśli obliczymy działanie dla odcinka AC, wyobrażając sobie, że cząstka porusza się w tym właśnie kierunku, a następnie policzymy działania dla odcinka DB, wyobrażając sobie, że cząstka porusza się od B do D, i mnożąc wynik przez minus jeden, bo w rzeczywistości kierunek ruchu jest przeciwny, to widzimy, że wkład drogi AC musi być równy wkładowi drogi BD, by mogły się one skasować. Wkłady obu tych dróg są jednakowe, ponieważ zależą one od zmiany działania wskutek przesunięcia, które jest takie samo na początku drogi (odcinek AC), jak też na końcu (odcinek BD). Jeśli zatem zasada wariacyjna jest spełniona i obowiązuje symetria ze względu na translację w przestrzeni, to istnieje pewna wielkość, która nie zmienia się w czasie ruchu. Wielkością, która się nie zmienia, jest tutaj pęd; mówiliśmy o nim w poprzednim wykładzie. Wiadujemy zatem, że jeśli można sformułować prawa fizyczne w postaci zasady wariacyjnej, to istnieje ścisły związek między

### Symetria praw fizycznych 113

prawami symetrii i zasadami zachowania. Natomiast możliwość takiego sformułowania praw fizycznych jest konsekwencją mechaniki kwantowej. Właśnie dlatego powiedziałem, że w istocie źródło związku między prawami symetrii i zasadami zachowania tkwi w mechanice kwantowej. Podobny wywód dla przesunięcia w czasie prowadzi do zasady zachowania energii. Konsekwencją symetrii ze względu na

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
obrotu w przestrzeni jest zasada zachowania momentu pędu. Natomiast symetria ze względu na odbicie, czyli inwersję przestrzeni, nie prowadzi do żadnej prostej zasady zachowania w klasycznym sensie. Učení nazwali tę wielkość parzystością. Istnieje zasada zachowania parzystości, ale to są w istocie tylko pewne skomplikowane słowa. Muszę wspomnieć o parzystości, bo mogliście przeczytać w gazetach, że prawo zachowania parzystości okazało się błędne. Byłoby znacznie łatwiej zrozumieć tę informację, gdyby napisano, że błędna jest hipoteza, jakoby nie można było odróżnić strony lewej od prawej. Skoro mówię o symetriach, chciałbym też wspomnieć, że w tej dziedzinie pojawiły się ostatnio kolejne problemy. Na przykład każda cząstka ma antycząstkę. Antycząstką elektronu jest pozyton, a protonu - antyproton. W zasadzie można by wytworzyć antymaterię, składającą się z atomów zbudowanych z antycząstek. Atom wodoru składa się z dodatniego protonu i ujemnego elektronu. Jeśli połączymy antyproton i pozyton, otrzymamy pewien rodzaj atomu wodoru: dokładnie antywodoru. W rzeczywistości nikomu to się w razie nie udało\*, ale teoretycznie można to zrobić. Podobnie można wytworzyć najróżniejsze atomy antymaterii. Teraz nasuwa się pytanie, czy antymateria zachowuje się tak samo jak znana nam materia. O ile wiem - tak. Obowiązuje tu reguła symetrii, która stwierdza, że dowolny układ zbudowany z antymaterii zachowuje się tak samo, jakby był zbudowany z materii. Rzecz jasna, gdyby doszło do spotkania takich dwóch układów, posypałyby się iskry i nastąpiła anihilacja.  
\* w latach dziewięćdziesiątych w kilku laboratoriach wytworzono antywodor (przyp. tłum.).

#### 114 Charakter praw fizycznych

Fizycy od dawna uważali, że antymateria zachowuje się zgodnie z takimi samymi prawami jak materia. Teraz jednak, gdy już wiemy, że symetria ze względu na odbicie lustrzane bywa naruszana, nasuwa się ważne pytanie. W rozpadzie antyneutronu powstaje antyproton, pozyton i neutrino. Czy pozyton zachowuje się tak samo jak elektron, to znaczy, czy wiruje w lewą stronę? Jeszcze niedawno wierzyliśmy, że pozyton zachowuje się zawsze odwrotnie, to znaczy jeśli elektron jest lewoskrętny, pozyton musi być prawoskrętny. Gdyby tak było, nie moglibyśmy w rzeczywistości wyjaśnić znajomemu Marsjaninowi, co to są lewa i prawa strona. Gdyby bowiem Marsjanin był zbudowany z antymaterii, uważałby za elektrony te cząstki, które my nazywamy pozytonami. Jego "elektrony" wirowałyby w odwrotnym kierunku niż nasze i uznałby on, że serce człowieka znajduje się po złej stronie. Przypuśćmy, że dzwoniś do Marsjanina i wyjaśniasz mu, jak zbudować człowieka. Marsjanin wykonuje instrukcje i wszystko działa. Następnie opowiadasz mu również o naszych zwyczajach. Na koniec, gdy Marsjanin wyjaśnia ci, jak zbudować dostatecznie dobry statek kosmiczny, lecisz na spotkanie tego człowieka. Podchodzisz do niego i wyciągasz prawą rękę. Jeśli również podniesie prawą rękę, to wszystko jest w porządku. Jeśli natomiast wyciągnie lewą dłoń, to lepiej uważaj... za chwilę zginiecie wskutek anihilacji!  
Żałuję, że nie mogę opowiedzieć o jeszcze kilku symetriach, ale dość trudno je wyjaśnić. Bardzo interesujące są różne przybliżone reguły symetrii. Na przykład lewą i prawą stronę możemy odróżnić tylko dzięki słabym oddziaływaniom jądrowym, odpowiedzialnym za rozpady beta. Oznacza to, że natura w 99,99 procent nie odróżnia strony lewej od prawej, ale istnieją bardzo słabe oddziaływania, odpowiedzialne za pewne charakterystyczne zjawisko, które mają zupełnie inny charakter. Kryje się tu tajemnica, której nikt dotąd nie potrafił wyjaśnić.

Rozróżnienie  
przeszłości  
i przyszłości

Dla wszystkich jest oczywiste, że zjawiska zachodzące we wszechświecie są nieodwracalne. Mam na myśli to, że zjawiska zachodzą w jednym, określonym kierunku. Gdy strącimy szklankę na podłogę, rozbija się ona na kawałki. Możemy później bardzo długo siedzieć i czekać, aż kawałki złożą się w całość, a szklanka podskoczy na stół. Jeśli przyglądamy się, jak załamują się fale morskie, możemy bardzo długo czekać, nim zobaczymy, jak piana zbiera się, wznosi do góry i cofa się na morze, po czym opada dalej od brzegu - to z pewnością byłoby bardzo piękny widok.

Podczas wykładów demonstruje się zazwyczaj tę własność natury za pomocą filmu przedstawiającego różne zjawiska, puszczonego w odwrotnym kierunku. Śmiech widzów jest jawnym dowodem, że w rzeczywistości takie zjawiska nigdy się nie zdarzają. W istocie jest to dość błędy sposób przedstawiania czegoś, co jest tak oczywiste i głębokie jak różnica między przeszłością i przyszłością. Nawet bez żadnych eksperymentów nasze przeżycia wewnętrzne pozwalają nam z łatwością rozróżnić przeszłość i przyszłość. Pamiętamy przeszłość, ale nie przyszłość. W inny sposób uświadamiamy sobie to, co mogło się zdarzyć, niż to, co zdarzyło się naprawdę. Z psychologicznego punktu widzenia przeszłość i przyszłość są diametralnie różne. Dowodem tego są takie pojęcia jak pamięć rzeczy przeszłych oraz poczucie wolnej woli, wyrażające przekonanie, że możemy coś zrobić, by wpłynąć na swoją przyszłość. Nikt lub prawie nikt nie wierzy, że potrafi zmieniać

116 Charakter praw fizycznych

przeszłość. Żal i nadzieja oraz inne słowa tego rodzaju wyrażają oczywiste dla wszystkich rozróżnienie między przeszłością i przyszłością.

Jeśli świat jest zrobiony z atomów i my również jesteśmy zrobieni z atomów oraz podlegamy prawom fizycznym, to najbardziej oczywistym wytłumaczeniem rozróżnienia między przeszłością i przyszłością oraz nieodwracalności zjawisk byłoby pewne prawo, jakieś prawo ruchu atomów, które stwierdzałoby, że atomy mogą ewoluować tylko w jednym kierunku. Wśród praw fizycznych powinna się znaleźć jakaś zasada, która stwierdza, że po "u" zawsze następuje "w" i nigdy nie zdarza się to w odwrotnej kolejności, przy czym jednokierunkowość oddziaływań powinna tu wyjaśniać, dlaczego wszystkie zjawiska we wszechświecie toczą się w jedną stronę.

Jak dotychczas nie znamy jednak takiej zasady. Wydaje się, że żadne z poznanych praw fizycznych nie pozwala odróżnić przeszłości od przyszłości. Film natury powinien wyglądać równie rozsądnie puszczonego normalnie czy wstecz, a oglądający go fizyk nie powinien się śmiać.

Weźmy nasz standardowy przykład - prawo powszechnego ciężenia. Mamy Słońce i planetę. Umieszczam planetę na orbicie, nadając jej pewną prędkość początkową, a następnie filmuję jej zachowanie. Jeśli puszcze ten film wstecz, co się stanie? Widzimy, że planeta krąży wokół Słońca, tyle że w przeciwnym kierunku. Promień wodzący planety w równych odstępach czasu zakreśla równe powierzchnie. Planeta porusza się dokładnie tak, jak powinna. Nie możemy stwierdzić, że film został puszczonego wstecz. Prawo powszechnego ciężenia ma taką postać, że kierunek upływu czasu nie ma znaczenia. Gdy sfilmujemy zjawiska, w których odgrywa rolę wyłącznie siła grawitacji, film będzie wyglądał równie zadowalająco puszczonego normalnie lub do tyłu. Można to wyrazić precyzyjniej. Gdybyśmy nagle odwrócili zwrot prędkości wszystkich cząstek należących do pewnego układu, po prostu oglądalibyśmy dawne zdarzenia w odwrotnej kolejności. Gdy mamy ewoluujący układ składający się z wielu czą-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
steczek i w pewnym momencie zmieniamy nagle zwrot prę-

Rozróżnienie przeszłości i przyszłości 117

kości cząsteczek, ewolucja układu potoczy się dalej, choć w przeciwną stronę.

Tak jest w przypadku prawa ciężenia i drugiej zasady dynamiki Newtona, stwierdzającej, że wskutek działania siły zmienia się prędkość ciała, czyli ciało przyspiesza. Jeśli zmienię kierunek upływu czasu - czyli znak współrzędnej  $t$  - to siły się nie zmieniają, a zatem nie zmieni się również przyspieszenie. Wobec tego seña zmian prędkości ciała następuje, ale w odwrotnej kolejności niż przedtem. Można łatwo wykazać, że prawo powszechnego ciężenia jest odwracalne w czasie.

A co z prawami elektryczności i magnetyzmu? Również są odwracalne w czasie. Silne oddziaływania jądrowe? O ile wiemy, one też są odwracalne. Słabe oddziaływania, rządzące rozpadami beta, o których mówiłem w poprzednim wykładzie?

Czy również są odwracalne? Doświadczenia wykonane nie-dawno sugerują, że jest tu coś, czego nie rozumiemy... Być może słabe oddziaływania nie są odwracalne, ale musimy jeszcze poczekać na wyniki następnych eksperymentów.\* Jedno wszak-że nie ulega wątpliwości. Słabe oddziaływania (które może są,

a może nie są odwracalne w czasie) w normalnych sytuacjach nie odgrywają niemal żadnej roli. To, że mogę mówić do was, nie zależy od słabych oddziaływań, choć zależy od oddziaływań chemicznych, sił elektrycznych, grawitacji i w pewnym stopniu także od silnych oddziaływań jądrowych. Ja jednak postępuję w sposób jednokierunkowy: gdy mówię, fale dźwiękowe wychodzą z moich ust, natomiast gdy otwieram usta, nie absorbuję żadnych fal. Ta nieodwracalność nie zależy od takich zjawisk, jak rozpad beta. Tak więc zwyczajne zjawiska, będące

\* Kolejne doświadczenia potwierdziły rezultaty eksperymentów, o których mówił Feynman. Dokładniej biorąc, bardzo ogólne i przekonujące argumenty teoretyczne wskazują, że oddziaływania elementarne powinny być symetryczne ze względu na trzy operacje wykonywane jednocześnie: sprzężenie ładunkowe (C), inwersję przestrzeni (P) i odwrócenie czasu (T). Operację taką oznaczamy CPT. Z doświadczenia wynika, że w pewnych słabych procesach naruszana bywa symetria CP (tzw. parzystość kombinowana). Oznacza to, że musi być naruszana również symetria T (przyp. ttum.).

118 Charakter praw fizycznych

konsekwencją ruchu atomów, zachodzą, jak sądzimy, zgodnie z prawami, które są odwracalne w czasie. Musimy zatem gdzie indziej szukać przyczyn nieodwracalności.

Jeśli dokładniej przyjrzymy się, jak poruszają się planety wokół Słońca, przekonamy się, że nie wszystko jest tu w porządku. Na przykład prędkość wirowania Ziemi wokół własnej osi powoli maleje z powodu tarcia przyptywowego. Dysypacja energii wskutek tarcia jest zjawiskiem nieodwracalnym.

Jeśli popchnę ciężarek leżący na podłodze, ciężarek przez chwilę będzie się ślizgał, po czym się zatrzyma. Choćbym nie wiem jak długo czekał, ciężarek nie przyspieszy nagle i nie wróci do mnie. Zjawiska związane z tarciem wydają się nieodwracalne. Jednak tarcie, jak już wspominałem, jest konsekwencją niesłychanej złożoności oddziaływań między podłogą i ciężarkiem. Uporządkowany ruch ciężarka zmienia się w nie-uporządkowane nieregularne drgania atomów w drewnie i ciężarku. Musimy dokładniej zbadać to zjawisko.

W rzeczy samej tu kryje się wskazówka, jak można wyjaśnić nieodwracalność. Rozważmy prosty przykład. Mamy zbiornik z przegrodą. Z jednej strony znajduje się woda zabarwiona atramentem, z drugiej czysta. Teraz bardzo delikatnie usuwamy przegrodę. Początkowo widzimy niebieską wodę z jednej strony, a czystą z drugiej. Chwilę czekamy. Stopniowo niebieska woda miesza się z czystą i ostatecznie cały zbiornik

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
wypełnia się jasnoniebieską mieszaniną wody i atramentu. Teraz nawet jeśli będziemy czekać bardzo długo, nie zobaczymy, by niebieska woda zgromadziła się z jednej strony, a czysta z drugiej. Można oddzielić atrament od wody w laboratorium. Należałoby wtedy odparować wodę i skroplić ją osobno, niebieski barwnik zaś, który pozostanie, rozpuścić w odpowiedniej ilości wody, aby otrzymać atrament. W ten sposób można przywrócić sytuację początkową, ale tym manipulacjom towarzyszyłoby wiele nieodwracalnych zjawisk. Natomiast nigdy nie zdarzy się, by nastąpiła spontaniczna separacja! I to jest pewna wskazówka. Przyjrzyjmy się zachowaniu cząsteczek. Przypuśćmy, że sfilmowaliśmy, jak miesza się woda niebieska z czystą. Jeśli oglądamy ten film od tyłu, wygląda

Rozróżnienie przeszłości i przyszłości 119

to dziwnie, ponieważ jednorodna mieszanina stopniowo się rozdziela, co jest oczywiście wariackim pomysłem. Powiększmy teraz obraz, tak aby każdy fizyk mógł śledzić zachowanie poszczególnych atomów i znaleźć przyczynę nieodwracalności. Początkowo mamy atomy dwóch rodzajów (to nonsens, ale nazywajmy je białymi i niebieskimi). Otóż ruchy cieplne powodują, że wszystkie atomy nieustannie zmieniają swe położenie i zderzają się między sobą. Gdybyśmy zaczęli od początku, mielibyśmy niebieskie atomy z jednej strony, a białe z drugiej. Nieregularne ruchy cieplne bilionów atomów powodują ich wymieszanie i woda przybiera kolor jasnoniebieski. Prześledźmy dokładnie pojedyncze zderzenia między atomami. Na filmie widać, jak atomy zbliżają się do siebie i odbijają jeden od drugiego. Jeśli puścimy ten kawałek filmu w drugą stronę, znów zobaczymy, jak atomy zbliżają się i odbijają od siebie. Fizyk przeprowadzi dokładne pomiary i stwierdzi: "Wszystko jest w porządku, atomy zachowują się zgodnie z prawami fizyki. Jeśli dwa atomy zderzają się pod pewnym kątem, to tak powinny się odbić". Zderzenia atomów są odwracalne w czasie. Prawa rządzące zderzeniami atomów i cząsteczek dopuszczają zmianę kierunku czasu. Jeśli zatem śledzimy zachowanie atomów zbyt szczegółowo, nie możemy wyjaśnić zachowania wody, gdyż każde zderzenie jest odwracalne. A jednak gdy oglądamy film puszczony wstecz, widzimy coś, co wydaje się absurdalne: po kolejnych zderzeniach niebieskie atomy gromadzą się z jednej strony zbiornika, a białe z drugiej. To jest niemożliwe: w naturalnych sytuacjach to nigdy się nie zdarza! A przecież gdy oglądamy poszczególne zderzenia na filmie puszczonym wstecz, wszystko wydaje się w porządku. Widzimy zatem, że nieodwracalność jest zjawiskiem statystycznym. Jeśli początkowo woda zabarwiona na niebiesko była oddzielona od czystej, to wskutek przypadkowych ruchów atomów nastąpiło wymieszanie jej z atramentem i otrzymaliśmy jednorodną mieszaninę. Gdybyśmy jednak zaczęli od jednorodnej mieszaniny, przypadkowe ruchy atomów nie spowodowałyby separacji składników. To mogłoby się zdarzyć. Nie

120 Charakter praw fizycznych

jest to sprzeczne z prawami fizyki, ale jest bardzo mało prawdopodobne. Coś takiego nie zdarza się nawet raz na milion lat! Na tym właśnie polega odpowiedź. Zjawiska są nieodwracalne tylko w takim sensie, że jeden kierunek jest bardziej prawdopodobny niż drugi, choć oba są zgodne z prawami fizyki. Jest rzeczą śmieszną przypuszczać, że jeśli będziemy czekać dostatecznie długo, to wskutek cieplnych ruchów atomów nastąpi ich separacja i atrament zgromadzi się z jednej strony, a czysta woda z drugiej.

Gdybym natomiast przeprowadził to doświadczenie w pudle zawierającym tylko cztery czy pięć cząsteczek każdego rodzaju, po pewnym czasie cząsteczki wymieszałyby się między

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
sobą. Przypuszczam jednak, że mogą państwo uwierzyć, iż po pewnym czasie - nie po upływie miliona lat, lecz powiedzmy po jakimś roku - zobaczylibyśmy, jak wskutek czystego przypadku cząsteczki wróciły do stanu mniej więcej takiego jak w chwili początkowej, przynajmniej w takim sensie, że mógłbym wstawić przegrodę i oddzielić cząsteczki białe od niebieskich. To jest możliwe. Jednak ciała, z którymi mamy normalnie do czynienia, nie składają się z czterech czy pięciu cząsteczek, lecz z czterech czy pięciu trylionów cząsteczek, które należałoby w ten sposób rozdzielić. Nieodwracalność zjawisk naturalnych wynika zatem nie z nieodwracalności podstawowych praw, lecz jest skutkiem tego, że zaczynamy od stanu uporządkowanego, a zderzenia bardzo licznych cząsteczek powodują, iż ewolucja zawsze przebiega tylko w jednym kierunku.  
W ten sposób dochodzimy do następnego pytania - jak powstał stan uporządkowany. W jaki sposób można rozpoznać od takiego stanu? Trudność polega na tym, że choć rozpoczynamy od stanu uporządkowanego, bynajmniej na nim nie kończymy. Jedną z reguł naszego świata głosi, że nieuporządkowanie zawsze wzrasta. Nawiasem mówiąc, słowa "porządek" i "nieporządek" należą do tych terminów fizycznych, które mają inny sens niż te same słowa w języku codziennym. Porządek nie musi być interesujący z ludzkiego punktu widzenia. Wystarczy, że mamy do czynienia z pewną określoną sytuacją: na przykład gdy wszystkie białe cząsteczki są z jednej

Rozróżnienie przeszłości i przyszłości 121  
strony, a niebieskie z drugiej, mamy stan uporządkowany, a gdy są wymieszane - nieuporządkowany  
Musimy zatem wyjaśnić, jak powstają stany uporządkowane i dlaczego, gdy widzimy jakąś normalną sytuację, która jest tylko częściowo uporządkowana, możemy dojść do wniosku, że najprawdopodobniej powstała z sytuacji bardziej uporządkowanej. Gdy patrzę na zbiornik i widzę, że z jednej strony woda jest ciemnoniebieska, z drugiej czysta, a pośrodku jasnoniebieska, i wiem, że od dwudziestu czy trzydziestu minut nikt nie zajmował się tym zbiornikiem, wówczas mogę odgadnąć, że w przeszłości zabarwiona woda była dokładniej oddzielona od czystej. Jeśli poczekam, to niebieska woda w zbiorniku wymieszasz się z czystą jeszcze dokładniej. Jeśli wiem, że zbiornikiem tym nikt się nie zajmował już dostatecznie długo, to mogę coś powiedzieć o jego stanie w przeszłości. Na przykład jeśli woda jest wyraźnie jaśniejsza z jednej strony, a ciemniejsza z drugiej, to z pewnością w przeszłości woda czysta była lepiej oddzielona od zabarwionej, gdyby bowiem było inaczej, teraz byłaby lepiej wymieszana. Można zatem na podstawie stanu obecnego powiedzieć coś o przeszłości danego układu.  
W rzeczywistości fizycy nie zajmują się zazwyczaj takimi problemami. Fizycy na ogół uważają, że warto zajmować się tylko przyszłością: "Oto warunki początkowe. Co stanie się dalej?". Natomiast większość naszych siostrzanych nauk zajmuje się przeszłością. Historia, geologia, historia astronomiczna - wszystkie te nauki zajmują się czymś innym niż przyszłość. Wydaje mi się, że przedstawiciele owych nauk mogliby formułować przewidywania zupełnie innego rodzaju niż fizycy. Fizyk powiada: "w danej sytuacji mogę przewidzieć, co stanie się dalej". Natomiast geolog mówi: "Prowadziłem tu wykopaliska i znalazłem kości pewnego rodzaju. Przewiduję, że jeśli będziemy kopać dalej, znajdziemy podobne kości". Historyk mówi wprowadzie o przeszłości, ale może to czynić, wypowiadając sądy o przyszłości. Gdy mówi, iż rewolucja francuska wybuchła w 1789 roku, oznacza to, że jeśli czytelnik zajrzy do innej książki o historii Francji, znajdzie tam taką samą datę. Historyk formułuje pewne przewidywania dotyczące doku-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)

mentów, których nigdy nie widział, których jeszcze nie odnaleziono. Przewiduje, że jeśli znajdziemy jeszcze jakieś dokumenty dotyczące Napoleona, to ich treść będzie zgodna z tym, co zostało zapisane w innych dokumentach. Powstaje pytanie, jak to jest możliwe. Jedyne sposoby, aby to wyjaśnić, polega na przyjęciu, że w przeszłości świat był pod tym względem bardziej uporządkowany niż obecnie.

Zdaniem niektórych uczonych w przeszłości porządek we wszechświecie powstał w następujący sposób. Początkowo wszechświat był w całkowicie nieuporządkowanym stanie, podobnym do dokładnie wymieszanej wody. Jak się przekonaliśmy, jeśli mamy bardzo niewiele cząsteczek, to po dostatecznie długim oczekiwaniu mamy szansę zobaczyć, jak wskutek czystego przypadku cząsteczki rozdzieliły się na dwie strony. Pewni fizycy (sto lat temu) zasugerowali, że cała sprawa polega na fluktuacjach wiecznie istniejącego wszechświata. (Fluktuacje to niewielkie, statystyczne odchylenia od stanu równowagi). Wszechświat fluktuował, a teraz widzimy, jak fluktuacja znika. Ktoś mógłby jednak zaprotestować: "Proszę się zastanowić, jak długo musielibyśmy czekać na tak ogromną fluktuację". To prawda, ale gdyby fluktuacja nie była na tyle duża, aby w toku ewolucji biologicznej mogły powstać inteligentne istoty, to nikt by jej nie zaobserwował. Musielibyśmy czekać na taką fluktuację, abyśmy sami mogli powstać i ją zaobserwować. Moim zdaniem teoria ta jest jednak błędna. Uważam ją za absurdalną z następującego powodu. Przypuśćmy, że badam niewielki fragment znacznie większego wszechświata, który powstał z całkowicie nieuporządkowanej sytuacji początkowej. Gdyby atomy w badanej próbce były uporządkowane, nie mógłbym na tej podstawie dojść do wniosku, że atomy są wszędzie uporządkowane. W istocie, gdybym zauważył coś dziwnego i uznał, że stan materii w tej próbce jest wynikiem fluktuacji, musiałbym przyjąć, że najprawdopodobniej stan ten powstał w wyniku fluktuacji obejmującej tylko objętość próbki i wszędzie indziej atomy są nieuporządkowane. Skoro powstanie takiej fluktuacji i tak jest mało prawdopodobne, nie ma sensu przyjmować jeszcze bardziej nieprawdopodobnej hi-

Rozróżnienie przeszłości i przyszłości 123

potęzy, że fluktuacja obejmuje znacznie większą objętość. Przywołajmy nasze doświadczenie ze zbiornikiem: jeśli w niewielkim pudełku zanurzonym w wodzie nastąpi separacja atomów białych i niebieskich, to jest najbardziej prawdopodobne, że w pozostałej objętości zbiornika atomy są wymieszane. Wobec tego gdybyśmy przyjęli, że obserwowany uporządkowany stan gwiazd jest wynikiem fluktuacji, powinniśmy oczekiwać, że jeśli zbadamy inny obszar wszechświata, odkryjemy kompletny chaos. Jeśli powstanie gorących gwiazd w zimnej przestrzeni było wynikiem fluktuacji, to w niezbadanych dotychczas obszarach nie powinniśmy znaleźć gwiazd. A skoro zawsze przewidujemy, że w niezbadanych obszarach znajdziemy takie same gwiazdy jak w naszym otoczeniu, lub że kolejne dokumenty potwierdzą to, co wiemy o Napoleonie, lub że geolog znajdzie takie kości, jakie już widywał, to sukcesy wszystkich takich przewidywań wymagają przyjęcia, że porządek nie jest wynikiem fluktuacji, lecz że w przeszłości cały świat był bardziej uporządkowany. Uważam zatem, że musimy uzupełnić listę praw fizycznych hipotezą stwierdzającą, iż w przeszłości świat był bardziej uporządkowany, w naukowym sensie tego słowa, niż jest obecnie. Wydaje mi się, że takie dodatkowe stwierdzenie jest konieczne, abyśmy mogli zrozumieć nieodwracalność zjawisk.

To stwierdzenie wyróżnia oczywiście jeden kierunek upływu czasu. Mówimy, że pod istotnym względem przeszłość różni się od przyszłości. Stwierdzenie takie wykracza jednak poza sprawy, które podlegają prawom fizycznym pojmowanym w przyjęty sposób. Obecnie odróżniamy prawa fizyczne



Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
rządzące ewolucją wszechświata od praw, które określają stan wszechświata w pewnej chwili w przeszłości. Takie prawa składają się na astronomiczną historię; być może wejda one kiedyś do zbioru praw fizycznych.  
Chciałbym teraz opowiedzieć o kilku interesujących aspektach nieodwracalności. Przyjrzyjmy się na przykład, jak właściwie działa nieodwracalna maszyna.  
Przypuśćmy, że zbudujemy urządzenie, które ma pracować tylko w jedną stronę. Takim urządzeniem jest na przykład ko-

## 124 Charakter praw fizycznych

### Ryc. 5.1

to zębate z zapadką. Mamy oto koło z asymetrycznymi zębami - z jednej strony łagodnie pochylonymi, z drugiej ostro ściętymi. Koło umieszczone jest na osi, a obok znajduje się zapadka na zawiasie, dociskana do koła sprężyną (ryc. 5.1). Takie koło może się obracać tylko w jedną stronę. Gdy spróbujemy je obrócić w stronę przeciwną, zapadka napotka ostro ścięty brzeg trybu i zablokuje obrót. Gdy kręcimy we właściwym kierunku, zapadka przeskakuje z zęba na ząb, trzask, trzask, trzask. (Wszyscy zapewne znają taki mechanizm; jest on używany na przykład w zegarkach. Dzięki niemu można nakręcić sprężynę, a zapadka nie pozwoli jej się rozkręcić). Mechanizm ten jest całkowicie "nieodwracalny", w tym sensie, że koło kręci się tylko w jedną stronę.  
Ktoś wpadł na pomysł, że taką nieodwracalną maszynę, koło zębate z zapadką, można wykorzystać do budowy interesującego i użytecznego urządzenia. Jak wiemy, cząsteczki powietrza nieustannie się poruszają w przypadkowych kierunkach. Jeśli zbudujemy bardzo delikatny instrument, będzie on zawsze drgał wskutek bombardowania przez cząsteczki powietrza. Wobec tego umieścimy koło z zapadką na osi z czterema łopatkami (ryc. 5.2).  
Łopatki znajdują się w pudle z gazem, a zatem są nieustannie bombardowane przez poruszające się bezładnie cząsteczki gazu. Zderzenia powodują, że łopatki są popychane czasami w jedną stronę, czasami w przeciwną. Jednak zębata sprawi, że łopatki mogą się obracać tylko w jednym kierunku.

## Rozróżnienie przeszłości i przyszłości 125

### Ryc. 5.2

Wobec tego koło zawsze porusza się w jednym kierunku i mamy coś w rodzaju wiecznie poruszającej się maszyny. Działanie tego urządzenia jest możliwe, ponieważ zębata działa w sposób nieodwracalny.  
W rzeczywistości trzeba jednak zanalizować działanie tego urządzenia nieco bardziej szczegółowo. Gdy koło obraca się w dozwolonym kierunku, ząb unosi zapadkę, która następnie spada na następny ząb. Zapadka odbija się i jeśli zderzenie jest doskonale sprężyste, już nieustannie podskakuje, co umożliwia kołu obrót w przeciwnym kierunku podczas podskoków.  
Wobec tego nasza maszyna może działać tylko wtedy, jeśli zapadka zatrzymuje się w dolnym położeniu albo natychmiast, albo po kilku podskokach. Jeśli podskoki ustają, to musi działać jakaś siła tłumiąca, podobna do tarcia. Podczas hamowania podskoków zapadki, co jest konieczne, by maszyna mogła działać, powstaje ciepło i koło staje się coraz gorętsze. Gdy jest już dostatecznie gorące, pojawia się nowy efekt. Łopatki w gazie wykonują tak zwane ruchy Browna. Teraz, wskutek tego samego zjawiska, zębata porusza się w obie strony. Niezależnie od materiału, z jakiego są zrobione koło i zapadka, gdy części te są dostatecznie gorące, zaczynają poruszać się w nieregul-

## 126 Charakter praw fizycznych

łamy sposób. Przy pewnej temperaturze zapadka zaczyna podskakiwać po prostu z powodu ruchów cieplnych cząstek, z których jest zbudowana. Zapadka podskakuje na kole z powodu tego samego zjawiska, które powoduje ruch łopatek. Zapadka jest teraz równie często w położeniu górnym, jak dolnym i koło obraca się w obie strony. Straciliśmy nieodwracalną maszynę! W istocie maszyna może działać nawet w odwrotnym kierunku. Jeśli mechanizm zapadkowy jest bardzo gorący, a pudło z kołem łopatkowym zimne, to każde uderzenie zapadki o łagodną stronę trybu powoduje ruch koła zębatego w przeciwnym kierunku niż normalnie. Następnie zapadka odbija się i znów uderza o następny ząb. Jeśli zębatka ma większą temperaturę niż koło łopatkowe i gaz w pudle, to maszyna zadziała w odwrotnym kierunku.

Co to ma wspólnego z temperaturą gazu wokół łopatek?

Przypuśćmy, że nie ma koła łopatkowego. Jeśli teraz uderzenie zapadki wprowi w ruch koło zębate, uderzy ono ostro ściętym brzegiem zęba o zapadkę i się odbije. Aby zapobiec temu, musimy zastosować mechanizm tłumiący, na przykład koło łopatkowe poruszające się w powietrzu. Teraz urządzenie działa w jednym kierunku, ale przeciwnym, niż planowaliśmy. Okazuje się, że niezależnie od szczegółów konstrukcji, koło tego rodzaju obraca się w jedną stronę lub w drugą, zależnie od tego, który mechanizm ma wyższą temperaturę. Ale ponieważ między elementami urządzenia następuje wymiana ciepła, temperatura zębatki i koła łopatkowego się wyrównuje i uśrednione położenie koła przestaje się zmieniać. Zjawiska naturalne zachodzą w określonym kierunku tylko wtedy, gdy układ nie jest w równowadze, gdy jedna strona jest spokojniejsza lub "bardziej niebieska" niż druga.

Z zasady zachowania energii wynika na pozór, że mamy pod ręką tyle energii, ile tylko zapagniemy. W przyrodzie energia nigdy nie pojawia się ani nie ginie. Jednak energia zawarta na przykład w morzu, w ruchach cieplnych cząsteczek wody, jest dla nas praktycznie niedostępna. Aby energię uporządkować i wykorzystać, konieczna jest różnica temperatur. W przeciwnym wypadku, choć energia istnieje, nie można jej użyć. Jest

## Rozróżnienie przeszłości i przyszłości 127

wielka różnica między energią i energią dostępną. Morze zawiera bardzo dużo energii, której jednak nie możemy wykorzystać. Zasada zachowania energii oznacza, że całkowita energia jest stała, ale w pewnych okolicznościach ruchy cieplne powodują, że energia jest rozłożona zupełnie równomiernie, a wtedy nie można jej skierować w żadną wybraną stronę; nie ma żadnego sposobu, żeby ją opanować.

wydaje mi się, że następująca analogia dobrze tłumaczy, na czym polega trudność. Nie wiem, czy przeżyliście coś, co mnie się zdarzyło. Siedzisz na plaży z kilkoma ręcznikami pod ręką, gdy nagle rozpoczyna się ulewa. Szybko zbierasz ręczniki i biegniesz do przebieralni. Zaczynasz się wycierać i w tym momencie spostrzegasz, że ręcznik jest nieco wilgotny, ale jednak bardziej suchy niż ty. Wycierasz się nim tak długo, dopóki nie stanie się zbyt mokry, po czym sięgasz po następny. Rychło się okazuje, że wszystkie ręczniki są już tak mokre jak ty. Nie ma już sposobu, żeby się osuszyć, ponieważ wszystkie ręczniki są równie wilgotne jak twoje ciało. Mógłbym wymyślić wielkość, którą nazwałbym "zdolnością usuwania wody". Ręcznik ma taką samą zdolność usuwania wody z twojego ciała jak ciało z ręcznika, gdy zatem próbujesz się wytrzeć, tyle samo wody przechodzi z twojego ciała na ręcznik, ile z ręcznika na ciało. Nie oznacza to, że ręcznik zawiera tyle samo wody, ile jest na tobie. Duży ręcznik zawiera więcej wody niż mały o takiej samej wilgotności. Gdy ręczniki są równie wilgotne jak ty,

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)

nic już nie możesz zrobić.

Woda przypomina tu energię, ponieważ całkowita ilość wody jest stała. (Jeśli na dworze pojawi się słońce, możesz wyjść i wyschnąć lub znaleźć inny ręcznik, ale założmy, że drzwi są zamknięte i nie możesz ani uwolnić się od swych ręczników, ani zdobyć nowych). Podobnie możemy sobie wyobrazić, że pewien obszar wszechświata tworzy układ zamknięty. Jeśli poczekamy dostatecznie długo, wypadki losowe sprawią, że energia, podobnie jak woda, będzie rozłożona zupełnie równomiernie i nic już nie pozostanie z jednokierunkowości. Ten obszar wszechświata będzie wtedy pozbawiony wszelkich interesujących cech.

#### 128 Charakter praw fizycznych

Jeśli nasza maszyna składająca się z mechanizmu zapadkowego i kota łopatkowego zostanie odizolowana od otoczenia, to temperatura obu elementów stopniowo się wyrówna i koło przestanie się kręcić w jakąkolwiek stronę. Dokładnie tak samo dzieje się z każdym układem zamkniętym: jeśli poczekamy dostatecznie długo, przepływ energii między elementami układu doprowadzi do powstania stanu równowagi, a wtedy nie będzie już energii, którą można by wykorzystać do jakiegokolwiek celu.

Nawiasem mówiąc, wielkością fizyczną, która odpowiada wilgotności czy też "zdolności usuwania wody", jest temperatura. Gdy dwa ciała są w równowadze, mają taką samą temperaturę, ale to nie oznacza, że zawierają tyle samo energii. Oznacza to tylko, że równie łatwo można czerpać energię z jednego, jak z drugiego. Temperatura jest jak "zdolność usuwania energii". Jeśli takie dwa ciała stykają się ze sobą, nic się nie dzieje; energia przepływa od jednego do drugiego i z powrotem w jednakowym tempie i całkowity przepływ energii jest równy zeru. Gdy wszystkie ciała należące do danego układu mają jednakową temperaturę, nie ma już energii zdatnej do wykorzystania. Nieodwracalność oznacza, że jeśli ciała mają różne temperatury, to w miarę upływu czasu ich temperatury się wyrównują i ilość energii użytecznej maleje.

To stwierdzenie jest równoważne drugiej zasadzie termodynamiki, zgodnie z którą entropia zawsze wzrasta. Nie zwracajmy sobie jednak głowy słowami. W naszym ujęciu energia dostępna zawsze maleje. Jest to charakterystyczna cecha Wszechświata. Jej przyczyną są bezładne ruchy cząsteczek. Bez ingerencji zewnętrznej różnice temperatur między ciałami pozostającymi ze sobą w kontakcie stopniowo zanikają. Jeśli dwa ciała mają taką samą temperaturę, na przykład czajnik z wodą na zgaszonej kuchence, to woda nie zamrznie nagle, ale i kuchenka się nie rozgrzeje. Jeśli natomiast mamy gorącą kuchenkę i rondel z lodem, to kuchenka ostygnie, a lód się stopi. Zmiany zachodzą zawsze w jednym kierunku, tak aby zminimalizować energię użyteczną.

#### Rozróżnienie przeszłości i przyszłości 129

To wszystko, co mam do powiedzenia na ten temat, ale chciałbym poczynić jeszcze kilka uwag. Mamy tu przykład pewnego oczywistego efektu nieodwracalności zjawisk, nie wynikający w oczywisty sposób z podstawowych praw fizycznych. Zrozumienie tego efektu wymaga bardzo rozbudowanej analizy. Efekt ten ma jednocześnie podstawowe znaczenie dla przebiegu wszystkich zjawisk. Moja pamięć i rozróżnienie przeszłości oraz przyszłości zależą od nieodwracalności zjawisk, a jednak nie potrafię jej objaśnić przez proste odwołanie się do fundamentalnych praw. Konieczna jest do tego długa analiza. Często się zdarza, że prawa fizyczne nie mają oczywistego i bezpośredniego związku z postrzeżeniami, ale są w różnej mierze wyabstrahowane z danych empirycznych. Doskonałym

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
tego przykładem jest odwracalność praw fizycznych i nie-  
odwracalność zjawisk.

Widoczne aspekty różnych zjawisk i szczegółowe prawa fizyczne często dzieli duży dystans. Na przykład, jeśli obserwujemy lodowiec ze znacznej odległości, widzimy wielkie skały i bryły lodu wpadające do morza, śledzimy ruch ogromnych mas lodu i tak dalej. Nie musimy wtedy koniecznie pamiętać, że lód jest zbudowany z niewielkich, heksagonalnych kryształków. Jeśli jednak zrozumiemy ruch mas lodu dostatecznie dobrze, przekonamy się, że jest on konsekwencją właściwości tych heksagonalnych kryształów. Zrozumienie zachowania lodowca jest bardzo trudne (w rzeczywistości nikt jeszcze nie potrafi go wyjaśnić, niezależnie od tego, jak starannie badał kryształy lodu). Uczeń ma jednak nadzieję, że jeśli dostatecznie dobrze poznają kryształy, to w końcu zrozumieją również zachowanie lodowców.

W tych wykładach mówię wprawdzie o podstawowych prawach fizycznych, ale muszę od razu zastrzec, że nawet znając wszystkie już odkryte podstawowe prawa, nie potrafimy natychmiast wyjaśnić zbyt wielu zjawisk. To wymaga dalszej poważnej pracy i udaje się tylko częściowo. Wydaje się, że natura jest tak zaprojektowana, iż najważniejsze cechy rzeczywistości wszechświata są niejako przypadkowym i złożonym wynikiem działania bardzo wielu praw.

### 130 Charakter praw fizycznych

Na przykład jądra atomowe zbudowane z wielu protonów i neutronów są bardzo złożone. Jądra mają tak zwane poziomy energii. Oznacza to, że jądro może znajdować się w wielu różnych stanach, różniących się energią. Różne jądra mają różne poziomy energii. Obliczenie energii tych poziomów jest bardzo trudnym zadaniem matematycznym, które udało się rozwiązać tylko częściowo. Energia poszczególnych poziomów wynika z działania praw o bardzo dużej złożoności i nie ma żadnej szczególnej tajemnicy w fakcie, że w jądrze azotu, składającym się z 15 cząstek, istnieje poziom o energii 2,4 miliona elektronowoltów, następny poziom o energii 7, 1 i tak dalej. Jest natomiast godne uwagi, że budowa całego wszechświata zależy od wartości energii jednego konkretnego poziomu jednego jądra. Chodzi o jądro węgla-12, które ma poziom o energii 7,82 miliona elektronowoltów. Ten fakt ma zasadnicze znaczenie dla historii wszechświata.

Sprawa wygląda następująco. Początkowo wszechświat wypełniony był niemal wyłącznie wodorem. Gdy wskutek działania grawitacji zapadają się obłoki wodoru, w ich wnętrzu temperatura szybko rośnie i mogą się rozpocząć reakcje jądrowe. Powstaje wtedy hel, który może się częściowo połączyć z wodorem, dzięki czemu powstaje kilka jeszcze nieco cięższych jąder. Te jądra są jednak niestabilne i szybko się rozpadają na hel i wodór. Przez pewien czas astrofizycy nie umieli wyjaśnić, jak powstały wszystkie pozostałe pierwiastki, ponieważ gdy zaczniemy od wodoru, procesy zachodzące wewnątrz gwiazd sprawiają, że powstanie tylko hel i kilka innych pierwiastków, aż wreszcie profesorowie Hoyle i Salpeter<sup>18</sup> wskazali rozwiązanie. Gdyby doszło do połączenia trzech jąder helu, powstałoby jądro węgla. Można łatwo obliczyć, jak często dochodzi do takich zderzeń w gwiazdzie. Okazało się, że jest to możliwe tylko pod jednym warunkiem: jeśli jądro węgla ma poziom o energii 7,82 miliona elektronowoltów. W takim przypadku trzy jądra helu pozostawałyby ze sobą razem dłużej, niż 18 Fred Hoyle, angielski astronom z Cambridge. Edwin Salpeter, amerykański fizyk z Uniwersytetu Comella.

### Rozróżnienie przeszłości i przyszłości 131

gdyby taki poziom nie istniał. W tym czasie jądro węgla mogłoby wziąć udział w kolejnej reakcji i w ten sposób powstały-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
by inne pierwiastki. Gdyby w jądrze węgla istniał poziom o energii 7,82 miliona elektronowoltów, potrafilibyśmy wyjaśnić pochodzenie pierwiastków. W ten sposób, od tyłu, astrofizycy przewidzieli, że w jądrze węgla musi istnieć poziom o energii 7,82 miliona elektronowoltów, co potwierdziły pomiary laboratoryjne. Wobec tego istnienie ciężkich pierwiastków we wszechświecie jest ściśle związane z faktem, że w jądrze węgla istnieje akurat taki poziom. Jednak istnienie różnych poziomów energii w jądrze jest konsekwencją bardzo skomplikowanych oddziaływań między 12 cząstkami w jądrze. Ten przykład doskonale ilustruje fakt, że zrozumienie fizycznych praw nie zawsze pozwala łatwo zrozumieć ważne zjawiska zachodzące we wszechświecie. Szczegóły rzeczywistych zjawisk są często bardzo odległe od praw fundamentalnych. Mamy pewien sposób prowadzenia rozważań o wszechświecie, polegający na wyróżnianiu rozmaitych poziomów, czyli pewnej hierarchii. Nie chcę tu bardzo precyzyjnie dzielić świata na określone poziomy, lecz tylko wskazać, na przykładzie pewnych koncepcji, co mam na myśli, gdy mówię o hierarchii idei.

Na przykład na jednym końcu mamy fundamentalne prawa fizyki. Następnie wymyślamy terminy określające pojęcia przybliżone, które, jak uważamy, można ostatecznie wyjaśnić, odwołując się do praw fundamentalnych. Przykładem takiego pojęcia jest ciepło. Ciepło to chaotyczny ruch i gdy mówimy, że jakaś rzecz jest gorąca, oznacza to tylko, iż bardzo dużo atomów w niej wykonuje chaotyczne ruchy. Jeśli jednak mówimy o ciepłe przez dłuższy czas, zapominamy czasami o bezładnych ruchach atomów. Podobnie gdy mówimy o lodowcach, nie zawsze pamiętamy o heksagonalnych kryształkach lodu i płatkach śnieżnych. Innym przykładem jest kryształ soli. Gdy rozpatrujemy go na poziomie elementarnym, widzimy tylko masę protonów, neutronów i elektronów. Mamy jednak pojęcie "kryształu soli", które zawiera cały układ fundamentalnych oddziaływań. Podobnie jest też z pojęciem ciśnienia.

### 132 Charakter praw fizycznych

Jeśli teraz pójdziemy wyżej, na kolejnym poziomie mamy własności substancji, takie jak na przykład "współczynnik załamania", który mówi nam, jak światło ugina się, przechodząc przez jakąś substancję. Mamy też "napięcie powierzchniowe", czyli dążenie wody do zbierania się w jednym miejscu. Oba te pojęcia możemy przedstawić ilościowo. Chciałbym przypomnieć, że musimy przejść kilka praw niżej, żeby wyjaśnić napięcie powierzchniowe jako skutek przyciągania się atomów, i tak dalej. Mamy jednak to użyteczne pojęcie napięcia powierzchniowego i gdy rozważamy zjawiska, w których ono występuje, nie zawsze wdajemy się w jego wewnętrzny mechanizm. Idźmy jeszcze wyżej. Gdy mówimy o wodzie, mamy fale i takie rzeczy jak sztorm, przy czym słowo "sztorm" oznacza ogromnie wiele zjawisk. Mówimy też o "plamach na Słońcu" i "gwiazdach", które są bardzo złożone. I nie zawsze warto cofać się w opisie do elementów najprostszych. W rzeczywistości nie jest to możliwe, bo im wyżej jesteśmy, tym więcej kroków wstecz musielibyśmy wykonać, a każdy z nich jest dość niepewny. Nie przemyśleliśmy ich jeszcze do końca.

Gdy posuwamy się coraz wyżej w hierarchii złożoności, dochodzimy do takich zjawisk, jak odruch mięśnia czy impuls nerwowy, które są niezwykle skomplikowane i wymagają nadzwyczaj złożonej organizacji mateńi. Następnie pojawiają się takie rzeczy, jak choćby "zaba".

Jeszcze wyżej mamy takie pojęcia, jak "człowiek" i "historia", czy też "polityczna konieczność". Są to pojęcia, których używamy do zrozumienia rzeczy na jeszcze wyższym poziomie. W ten sposób dochodzimy do takich rzeczy jak zło, piękno, nadzieja...

Który kraniec jest bliżej Boga, jeśli wolno mi użyć religijnej

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
metafory? Piękno i nadzieja czy fundamentalne prawa? Sądzę, że oczywiście należy powiedzieć, iż powinniśmy patrzeć na całość struktury danej rzeczy; że wszystkie nauki, i nie tylko nauki, ale wszystkie intelektualne usiłowania polegają na próbach dostrzeżenia więzi między różnymi poziomami hierarchii, na łączeniu piękna z historią, historii z psychologią, psychologii z neurologią, neurologii z działaniem neuronów,

( Rozróżnienie przeszłości i przy'szłości 133  
wiedzy o działaniu neuronów z chemią, i tak dalej, w górę i w dół. Dziś nie potrafimy, i nie ma co udawać, że jest inaczej, pociągnąć linii od jednego krańca do drugiego, ponieważ dopiero od niedawna nauczyliśmy się dostrzegać taką hierarchię. I nie myślę, by którykolwiek z krańców był bliżej Boga. Wybór jednego krańca jako jedyne punktu wyjścia w nadziei, że ten kierunek doprowadzi do pełnego zrozumienia, jest błędem. Podobnie jest błędem opowiadanie się za takimi pojęciami, jak zło, piękno i nadzieja, lub też za prawami podstawowymi, licząc na to, że zbadanie tego jedynie aspektu umożliwi głębokie zrozumienie całego świata. Nie ma sensu, aby ci, którzy specjalizują się w poszukiwaniach "na jednym końcu", lekceważyli tych z krańca przeciwnego. (W rzeczywistości badacze wcale się nie lekceważą, choć często spotyka się takie opinie). Liczni ludzie zajmujący się problemami z dziedzin leżących między tymi skrajnościami wiążą ze sobą kolejne poziomy, dzięki czemu coraz lepiej rozumiemy świat, prowadząc badania zarówno "z obu krańców", jak i "od środka". W ten sposób stopniowo poznajemy ogromny świat splatających się ze sobą poziomów.

Prawdopodobieństwo  
i niepewność -  
kwantowa teoria  
natury

Historia obserwacji eksperymentalnych i wszystkich innych obserwacji naukowych rozpoczyna się od intuicyjnego przekonania, opartego w istocie na prostych doświadczeniach z przedmiotami, z którymi mamy do czynienia na co dzień, że rozmaite zjawiska dają się rozsądnie wyjaśnić. W miarę jak usiłujemy rozszerzyć opis obserwowanych zjawisk i nadać mu większą spójność, w miarę jak badamy coraz więcej zjawisk, zamiast prostych wyjaśnień formułujemy tak zwane prawa fizyczne. Prawa te mają jedną dziwną cechę - im bardziej wzrasta ich ogólność, tym stają się odleglejsze od zdroworozsądkowych przekonań i intuicyjnie coraz mniej zrozumiałe. Na przykład z teorii względności wynika, że jeśli ktoś myśli, iż dwa zdarzenia nastąpiły równocześnie, to jest to wyłącznie jego prywatna opinia. Ktoś inny może uważać, że jedno z tych zdarzeń nastąpiło wcześniej. Pojęcie równoczesności ma charakter subiektywny. Nie ma żadnego powodu, abyśmy mieli prawo oczekiwać, że będzie inaczej, ponieważ rzeczy, z którymi mamy do czynienia na co dzień, składają się z wielkiej liczby cząsteczek lub poruszają się bardzo wolno, lub posiadają inne jeszcze specjalne cechy, które sprawiają, że nasz kontakt z naturą jest bardzo ograniczony. Bezpośrednie postrzeżenia pozwalają poznać tylko bardzo ograniczoną klasę zjawisk naturalnych. Jedynie staranne pomiary i uważne eksperymenty umożliwiają nam poznanie in-

136 Charakter praw fizycznych  
nych zjawisk. Widzimy wtedy zupełnie nieoczekiwane rzeczy, takie, których nigdy byśmy nie potrafili przewidzieć, a nawet sobie wyobrazić. Musimy maksymalnie wyteżać wyobraźnię, nie po to, żeby odwrotnie niż w literaturze, wyobrazić sobie rzeczy, których naprawdę nie ma, ale by zrozumieć to, co naprawdę ist-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
nieje. O takiej właśnie sytuacji chcę mówić w tym wykładzie. Zaczynamy od historii światła. Początkowo zakładano, że światło zachowuje się jak wiązka cząstek, korpuskul, czyli tak jak krople deszczu lub pociski z karabinu. Dalsze badania wykazały jednak, że ta koncepcja była błędna. Światło zachowuje się jak fale, na przykład fale wodne. W XX wieku kolejne eksperymenty dowiodły, że jednak pod wieloma względami światło zachowuje się tak wiązka cząstek. Cząstki takie, dziś zwane fotonami, można policzyć, obserwując zjawisko fotoelektryczne. W pierwszych eksperymentach, które doprowadziły do odkrycia elektronów, fizycy widzieli, że elektrony zachowują się dokładnie tak, jak powinny zachowywać się cząstki. Późniejsze doświadczenia, na przykład badania dyfrakcji, wykazały, że elektrony zachowują się czasami jak fale. W miarę upływu lat narastało powszechne zamieszanie. Czym są właściwie elektrony i fotony, czy to cząstki, czy fale? Fale czy cząstki? wydawało się, że to i to, cząstki i fale. Dwuznaczności te zostały wyjaśnione w latach 1925-1926, po odkryciu poprawnych równań mechaniki kwantowej. Dziś wiemy, jak zachowują się fotony i elektrony. Jak jednak powinienem je nazwać? Gdybym powiedział, że są to cząstki, byłoby to mylące, ponieważ czasem zachowują się jak fale. Nie mogę również powiedzieć, że są to fale, bo czasami zachowują się jak cząstki. Fotony i elektrony zachowują się w sposób nie mający żadnego odpowiednika klasycznego, w sposób kwantowo-mechaniczny. Takiego zachowania nigdy bezpośrednio nie obserwowaliśmy. Wasze doświadczenie, związane z rzeczami, które widzieliście, jest bardzo niekompletne. W bardzo małej skali zachodzą zupełnie nowe zjawiska. Atom nie zachowuje się jak ciężarek oscylujący na sprężynie. Nie zachowuje się również jak miniaturowy Układ Słoneczny, z planetami krążącymi po orbitach. Nie jest to również jakaś chmu-

Prawdopodobieństwo i niepewność 137

ra czy mgiełka otaczająca jądro. Atom zachowuje się inaczej niż wszystkie znane nam rzeczy.

Na pociechę mamy przynajmniej jedno uproszczenie. Pod tym względem elektrony zachowują się dokładnie tak samo jak fotony; ich zachowanie jest wariackie, ale przynajmniej dokładnie takie samo.

Zrozumienie zachowania elektronów wymaga dużej dozy wyobraźni, gdyż musimy opisać coś, co różni się od wszystkich znanych nam rzeczy. Pod tym względem jest to zapewne najtrudniejszy z tych wykładów, gdyż ma on charakter abstrakcyjny, to znaczy dość odległy od bezpośrednich postrzeżeń. Nie ma na to rady. Skoro mam wygłosić senę wykładów o prawach fizycznych, to z pewnością nie spełniłbym swego zadania, gdybym pomiął prawa rządzące zachowaniem cząstek w małej skali. Takie zachowanie jest absolutnie typowe dla wszystkich cząstek elementarnych, ma charakter całkowicie powszechny, jeśli zatem chcecie dowiedzieć się czegoś o prawach fizycznych, muszę koniecznie omówić również prawa kwantowe.

To będzie trudne. Trudność ma jednak głównie charakter psychologiczny; przybiera ona postać nieustannych cierpień, powodowanych przez powtarzane pytanie "ale jak to jest możliwe?", będące wyrazem niekontrolowanego, lecz całkowicie bezskutecznego pragnienia zrozumienia zjawisk kwantowych przez odwołanie się do czegoś znanego. Nie będę wyjaśniał zjawisk kwantowych, korzystając z analogii do znanych zjawisk. Zamiast tego po prostu opiszę. Kiedyś dziennikarze wymyślili, że tylko dwunastu ludzi na świecie rozumie teorię względności. Nie wierzę w tę ich rewelację. Natomiast kiedyś było tak, że znał ją tylko jeden człowiek, ten, który ją odkrył, lecz jeszcze nie opublikował swej pracy. Gdy jednak ludzie przeczytali jego artykuł, wielu z nich w ten czy inny sposób zrozumiało teorie względności. Z pewnością było ich więcej niż dwunastu. Z drugiej strony sądzę, że mogę bezpiecznie stwierdzić, iż nikt nie ro-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
zumie mechaniki kwantowej. Proszę zatem nie traktować tego wykładu zbyt poważnie i nie próbować zrozumieć tego, co będę mówił, przez odwołanie się do pewnego modelu. Zamierzam powiedzieć, jak zachowuje się natura. Jeśli jesteście goto-

### 138 Charakter praw fizycznych

wi po prostu przyjąć, że może właśnie tak się ona zachowuje, to przekonacie się, że natura jest czarująca i zachwycająca. Nie powtarzajcie sobie, o ile tylko potraficie, "ale jak to możliwe?", ponieważ wpadniecie w przepaść, w ślepą uliczkę, z której nikomu jeszcze nie udało się uciec. Nikt nie wie, jak to jest możliwe. Chciałbym teraz opisać typowe kwantowe zachowanie elektronów i fotonów. W tym celu zamierzam posłużyć się mieszaną analogii i przeciwstawień. Gdybym chciał skorzystać wyłącznie z analogii, do niczego by to nie doprowadziło. Muszę jednocześnie wskazać na podobieństwa i różnice między zjawiskami kwantowymi i zjawiskami, które znacie. Najpierw porównam cząstki kwantowe z pociskami, a następnie z falami na wodzie. Zamierzam przedstawić pewien szczególny eksperyment. Najpierw omówię, jak przebiegałoby doświadczenie z pociskami, potem powiem, czego należałoby się spodziewać, gdybyśmy przeprowadzili doświadczenie z falami, a na koniec wyjaśnię, co się dzieje, gdy wykonamy taki eksperyment z elektronami lub fotonami. Ten jeden eksperyment zawiera w sobie wszystkie tajemnice mechaniki kwantowej. Jego analiza pozwoli wam na zapoznanie się ze wszystkimi osobliwościami i paradoksami natury. Każdy inny problem z dziedziny teorii kwantów można zawsze wyjaśnić, wracając do tego doświadczenia: "Pamiętasz, jak to było w doświadczeniu z dwiema szczelinami? Tutaj wygląda to tak samo". Zamierzam przedstawić doświadczenie z dwiema szczelinami. Ten eksperyment pozwoli dotknąć tajemnicy mechaniki kwantowej. Nie pomnę tu niczego, przeciwnie, odsłonię tajemnicę natury w jej najbardziej eleganckiej, choć trudnej postaci. Zaczniemy od pocisków (ryc. 6.1). Przypuśćmy, że mamy karabin maszynowy. Bezpośrednio przed karabinem stoi płyta pancerna z jednym otworem. Znacznie dalej stoi druga płyta z dwiema szczelinami - stąd nazwa tego słynnego doświadczenia. Będę bardzo dużo mówił o tych szczelinach, dlatego od razu je ponumerujemy: oto szczelina nr 1 i szczelina nr 2. Jeszcze dalej mamy ekran; może to być jakaś ściana, na której umieścimy różne detektory. W przypadku pocisków za detektor może posłużyć skrzynia z piaskiem, w którym zagłębiają się kule, tak że możemy je policzyć. Zamierzam wykonać eksperyment, że-

### Prawdopodobieństwo i niepewność

139

2.

### Ryc. 6. 1

by stwierdzić, ile pocisków trafia w detektor, czyli w skrzynię z piaskiem, w zależności od położenia detektora. W celu określenia położenia skrzyni będę posługiwał się odległością od wybranego punktu; odległość tę oznaczam symbolem  $x$ . Będę mówił, że coś się dzieje, gdy zmieniamy  $x$ , ale to oznacza tylko, że poruszam skrzynię w górę lub w dół. Przede wszystkim muszę wprowadzić trzy modyfikacje w porównaniu z sytuacją, gdybyśmy mieli do czynienia z prawdziwymi pociskami. Po pierwsze, przyjmuję, że karabin jest bardzo kiepski i rozklekotany, przeto pociski lecą w różnych kierunkach, tak że możliwe są nawet rykoszety od płyt pancernych. Po drugie, powinniśmy założyć, choć nie jest to bardzo ważne, że wszystkie pociski mają taką samą prędkość, a zatem również energię. Po trzecie - i ta idealizacja jest najważniejsza - pociski są absolutnie nie-



Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
zniszczalne, a zatem w skrzyni nie znajdujemy odłamków, lecz  
zawsze całe pociski. Proszę sobie wyobrazić albo niezniszczal-  
ne pociski, albo twarde pociski i miękką płytę pancerną.  
Przede wszystkim musimy zwrócić uwagę, że pociski to  
obiekty, które nadlatują w jednym kawałku. Gdy do detektora  
dociera energia, ma ona postać jednej porcji, a więc następuje  
jedno uderzenie. Można policzyć kolejne pociski - jeden, dwa,  
trzy, cztery. Przyjmujemy, że wszystkie pociski mają takie same  
rozmiary, przy czym każdy pocisk albo cały trafia w skrzynię,  
albo nie; niemożliwa jest sytuacja pośrednia. Ponadto jeśli  
ustawimy dwie skrzynie, nigdy się nie zdarza, aby dwa pociski

#### 140 Charakter praw fizycznych

trafiły w skrzynię równocześnie. Zakładam, że karabin strzela  
na tyle wolno, iż jestem w stanie zobaczyć, jak nadlatują kolej-  
ne pociski. Możemy tak zmodyfikować karabin, aby strzelał  
bardzo powoli. Zamiast tego możemy szybko obserwować  
skrzynie! Przekonamy się wtedy, że nigdy się nie zdarza, aby  
pocisk trafił równocześnie w dwie skrzynie, ponieważ każdy  
pocisk stanowi jedną, niepodzielną całość.  
Teraz chcę zmierzyć, ile średnio pocisków wpada do skrzyni  
w danym czasie. Powiedzmy, że czekamy godzinę, liczymy pocis-  
ki w piachu, po czym wyznaczamy średnią. Liczbę pocisków,  
która dociera do skrzyni w ciągu godziny, będziemy nazywać  
prawdopodobieństwem trafienia, ponieważ określa ona, jakie  
jest prawdopodobieństwo, że pocisk przelatujący przez szczeli-  
ny trafi w tę skrzynię. Liczba pocisków trafiających w skrzynię  
zależy oczywiście od jej położenia, czyli odległości<sup>Λ</sup>. Wykres na  
ryc. 6. 1 przedstawia liczbę pocisków, jaką otrzymuję, jeśli dla  
każdego położenia skrzyni prowadzę eksperyment przez godzi-  
nę. Krzywa wygląda mniej więcej tak jak krzywa  $N^{\Lambda}$ , ponieważ  
gdy skrzynia jest za jedną ze szczelin, trafia do niej wiele pocis-  
ków, a gdy nie leży na linii prostej przechodzącej przez szczelinę  
i otwór w pierwszej płycie pancerniej, mogą do niej dotrzeć tylko  
te pociski, które zawadziły o krawędź szczeliny, a zatem ich liczb-  
a szybko maleje. Liczbę pocisków, które trafiły w skrzynię  
w ciągu godziny, będę oznaczał  $N^{\Lambda}$ , co po prostu oznacza liczb-  
ę pocisków, które dotarły do skrzyni przez szczelinę nr 1 i nr 2.  
Przypominam, że liczba pocisków, jaką przedstawia wy-  
kres, nie musi być całkowita. Może mieć taką wartość, jaka wy-  
padnie, na przykład dwa i pół pocisku na godzinę, mimo że  
pociski są niepodzielne. Taki wynik oznacza tylko, że w ciągu  
dziesięciu godzin otrzymam dwadzieścia pięć pocisków, a za-  
tem średnia wynosi dwa i pół pocisku na godzinę. Z pewno-  
ścią wszyscy znają dowcip o tym, że typowa amerykańska ro-  
dzina ma dwa i pół dziecka. To nie oznacza, że w rodzinie jest  
pół dziecka - każde dziecko też jest niepodzielną całością. Jed-  
nak jeśli liczymy średnią liczbę dzieci w rodzinie, to możemy  
otrzymać dowolny wynik. Tak samo liczba  $N^{\Lambda}$ , czyli średnia  
liczba pocisków, które trafiają w skrzynię w ciągu godziny, nie

#### Prawdopodobieństwo i niepewność 141

musi być całkowita. W tym doświadczeniu mierzymy prawdo-  
podobieństwo trafienia, czyli średnią liczbę pocisków trafiają-  
cych w skrzynię w danym czasie.

Na koniec warto zauważyć, że krzywą  $N^{\Lambda}$  możemy bardzo  
ładnie zinterpretować jako wynik złożenia dwóch krzywych,  $N_1$   
i  $N_2$ .  $N^{\Lambda}$  to liczba pocisków, które docierają do skrzyni, gdy  
szczelina nr 2 jest zamknięta;  $N_1$  to liczba pocisków, które do-  
cierają wyłącznie przez szczelinę nr 2, gdy zamknięta jest szcze-  
lina nr 1. Odkryliśmy właśnie bardzo ważne prawo, które  
stwierdza, że liczba pocisków trafiających w skrzynię, gdy obie  
szczeliny są otwarte, jest równa sumie liczby pocisków przela-  
tujących przez szczelinę nr 1 oraz liczby pocisków przelatują-  
cych przez szczelinę nr 2. Jeśli w celu wyznaczenia całkowitej  
liczby pocisków wystarczy dodać do siebie te dwie liczby, to

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
mówimy, że "w eksperymencie nie zachodzi interferencja":  
 $N^{\wedge} = N^{\wedge} + N^{\wedge}$  (brak interferencji).

Z taką sytuacją mamy do czynienia w przypadku doświadczenia z pociskami. Teraz powtórzmy to samo doświadczenie z falami na wodzie zamiast pocisków (ryc. 6.2). Źródłem fal jest teraz wielki klocek, pływający w wodzie. Zamiast płyty pancernej

0

12.

Ryc. 6.2

142 Charakter praw fizycznych

mamy szereg barek lub dwa falochrony z przerwą. Hm, może lepiej będzie przeprowadzić to doświadczenie z małymi zmarszczkami na wodzie, a nie wielkimi morskimi falami; to brzmi rozsądniej. Zatem będę machał palcem w wodzie, żeby robić fale, a zamiast barek czy falochronów posłuży się drewnianą deską z otworem, przez który przechodzą fale. Dalej znajduje się druga deska z dwoma otworami, a jeszcze dalej detektor. Jak zrobić detektor? Detektor ma wykrywać ruchy wody, mogę więc na przykład położyć na wodzie kawałek korka i mierzyć, jak unosi się i opada. W ten sposób mierzę energię drgań korka, która jest bezpośrednio proporcjonalna do energii przenoszonej przez fale. Jeszcze jedno: muszę uważać, żeby machać palcem bardzo regularnie, tak by odstępy między kolejnymi falami miały jednakową długość. W przypadku fal wodnych należy koniecznie podkreślić, że wielkość mierzona ma ciągły charakter - może przyjmować dowolną wartość. Mierzymy natężenie fali lub energię korka, a jeśli fale są bardzo łagodne, gdyż poruszam palcem bardzo wolno, to korek również porusza się bardzo spokojnie. Wielkości te są ściśle proporcjonalne. wychylenie korka może być dowolne; nie jest to wielkość dyskretna.

Będziemy mierzyć natężenie fal, a mówiąc ściślej, energię fali przechodzącej przez dany punkt. Natężenie będę oznaczał literą  $I$ , żeby przypomnieć wszystkim, że chodzi właśnie o natężenie, nie zaś o liczbę cząstek. Jakie otrzymujemy wyniki? Rycina 6.2 przedstawia wykres natężenia  $I^{\wedge}$  fali, gdy otwarte są obie szczeliny. To interesująca, skomplikowana krzywa. Gdy przesuwamy detektor, widzimy, że natężenie zmienia się bardzo gwałtownie i w bardzo szczególny sposób. Zapewne wiecie, dlaczego natężenie tak się zmienia. Przyczyną jest to, że dochodzące fale mają grzbiety i doliny. Do danego punktu docierają dwie fale, z obu szczelin. Gdy detektor znajduje się dokładnie pośrodku obu szczelin, wówczas dwie fale docierają do niego równocześnie, ich grzbiety nakładają się na siebie i mamy falę o dużej amplitudzie. Zatem dokładnie pośrodku mamy wyraźne maksimum. Jeśli teraz przesunę detektor nieco w bok, tak że znajdzie się on dalej od szczeliny nr 2 niż szczeliny nr 1, to fale ze szczeliny nr 2 potrzebują więcej czasu na

Prawdopodobieństwo i niepewność 143

dotarcie do detektora niż fale ze szczeliny nr 1. Wobec tego, gdy ze szczeliny nr 1 dociera grzbiet kolejnej fali, grzbiet fali ze szczeliny nr 2 jeszcze jest w drodze; w istocie w tym momencie do detektora dociera dolina fali z tej szczeliny. Woda usiłuje zatem jednocześnie podnieść się i opaść, wskutek czego wcale się nie porusza, lub niemal wcale. Zatem w tym punkcie mamy minimum natężenia. Jeśli przesuniemy detektor jeszcze dalej w bok, opóźnienie fal ze szczeliny nr 2 wzrasta na tyle, że wraz z grzbietem fali ze szczeliny nr 1 dociera do detektora grzbiet poprzedniej fali ze szczeliny nr 2 i znów otrzymujemy maksimum natężenia. W ten sposób wskutek "interferencji fal" powtarzają się minima i maksima natężenia. Słowo "inter-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)

ferencja" używane jest w fizyce w zabawny sposób. Możliwa jest interferencja konstruktywna, gdy fale wzmacniają się wzajemnie, lub destruktywna, gdy się kasują. Ważne jest tutaj, że natężenie  $I$  nie jest równe  $I_1$  plus  $I_2$ , mówimy, że natężenie jest skutkiem interferencji. Możemy się przekonać, jak wyglądają  $I_1$  i  $I_2$ , zamykając szczelinę nr 1, żeby wyznaczyć  $I_1$ , oraz szczelinę nr 2, żeby wyznaczyć  $I_2$ . Na rycinie 6.2 widzimy odpowiednie wykresy. Proszę zauważyć, że  $I$  wygląda tak jak  $I_1 + I_2$ , a jednak  $I$  wygląda zupełnie inaczej niż  $I_1 + I_2$ . Matematyka krzywej  $I$  jest dość interesująca. Poziom wzdłuż będziemy oznaczać symbolem  $x$ . Gdy otwarte są obie szczeliny, wysokość  $A(x)$ , na jaką wznosi się woda, jest równa sumie wysokości fal ze szczelin nr 1 i nr 2. Można uznać, że dolina fali ze szczeliny nr 2 ma ujemną wysokość i kasuje dodatnią wysokość grzbietu fali ze szczeliny nr 1. Tak się dzieje, jeśli interesuje nas wysokość fali, ale natężenie, na przykład gdy otwarte są obie szczeliny, nie jest proporcjonalne do wysokości, lecz do kwadratu wysokości fali. Dostajemy bardzo interesujące wyniki właśnie dlatego, że mamy do czynienia z kwadratami:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta)$$

ale

$$I = I_1 + I_2 \quad (\text{interferencja})$$

$$I = (A_1 + A_2)^2$$

#### 144 Charakter praw fizycznych

$$I_1 = (A_1)^2$$

$$I_2 = (A_2)^2$$

To była woda. Teraz zacznijmy od początku, tym razem z elektronami (ryc. 6.3).

Źródłem elektronów jest gorący drucik; przegrody można zrobić z wolframu, a do detekcji elektronów wykorzystać można dowolne urządzenie elektryczne dostatecznie czułe, żeby zareagowało na ładunek elektronu. Jeśli ktoś woli, może zamiast z elektronami przeprowadzić doświadczenie z fotonami; wtedy zamiast blach z wolframu przydatny będzie czarny papier - choć właściwie czarny papier nie jest zbyt dobry, bo włókna nie pozwalają wyciąć dostatecznie ostrych szczelin. Trzeba zatem użyć czegoś lepszego. Jako detektora użyjemy fotopowielacza, który pozwala zarejestrować pojedyncze fotony. Co dzieje się w obu przypadkach? Omówię tu tylko doświadczenie z elektronami, ponieważ przypadek fotonów niczym się nie różni. Przede wszystkim detektor elektronów, wyposażony w odpowiednie wzmacniacz, sygnalizuje detekcję dyskretnych wielkości. Każdy sygnał ma określoną, zawsze taką samą wielkość. Gdy osłabiamy źródło, sygnały są rejestrowane rzadziej, ale ich

$$N = N_1 + N_2$$

$$N = (A_1 + A_2)^2$$

$$N = (A_1 + A_2)^2$$

$$N = (A_1 + A_2)^2$$

#### Ryc. 6.3

#### Prawdopodobieństwo i niepewność 145

wielkość się nie zmieni. Jeśli wzmacniamy źródło, sygnały nadchodzą tak szybko, że zapychają wzmacniacz. Należy tak dobrać liczbę emitowanych elektronów, aby detektor mógł bez trudu rozróżnić poszczególne sygnały. Jeśli następnie obok umieścimy drugi detektor, nigdy się nie zdarzy, aby oba detektory równocześnie zarejestrowały sygnał. Przynajmniej jeśli źródło jest dostatecznie słabe, a detektory umożliwiają dostatecznie precyzyjną rejestrację czasu nadejścia sygnału. Możemy zmniejszyć jasność źródła tak, aby elektrony nadlatywały pojedynczo, a wtedy nigdy się nie zdarzy, aby oba detektory zarejestrowały sygnał równocześnie. Oznacza to, że detektory rejestrują wielko-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)

ści istniejące w postaci skupionej, mające określone rozmiary i docierające do określonego miejsca. Dobrze; zatem fotony i elektrony to obiekty skupione w niewielkiej objętości. Skoro tak, to możemy zrobić to, co zrobiliśmy w doświadczeniu z pociskami - możemy zmierzyć prawdopodobieństwo rejestracji elektronu w określonym miejscu. Zmieniamy zatem położenie detektora; gdybyśmy chcieli, moglibyśmy skorzystać z wielu detektorów równocześnie i w ten sposób otrzymać od razu całą krzywą, ale to byłoby kosztowne. Dla każdego położenia prowadzimy obserwacje przez godzinę, liczymy zarejestrowane elektrony i wyznaczamy średnią. Jak liczba elektronów, docierających do detektora, zależy od jego położenia? Czy zmienia się tak samo jak  $A^2$  dla pocisków? Na rycinie 6.3 widzimy wykres krzywej  $N^2$  dla elektronów, gdy otwarte są obie szczeliny. Natura jest już taka, że w tym doświadczeniu otrzymujemy taką samą krzywą jak w przypadku interferencji fal. Co właściwie przedstawia ta krzywa? Nie jest to energia fali, a tylko prawdopodobieństwo rejestracji jednego z tych skupionych obiektów. Matematyka jest prosta. Zamiast  $I$  mamy teraz  $N$ , a zatem powinniśmy również zmienić  $h$ . Nie jest to już wysokość, ale coś nowego; oznaczymy to literą  $a$  i nazwiemy amplitudą prawdopodobieństwa, ponieważ nie wiemy, co to oznacza. Zatem  $a_1$  to amplituda prawdopodobieństwa rejestracji elektronu ze szczeliny nr 1,  $a_2$  zaś - amplituda prawdopodobieństwa rejestracji elektronu ze szczeliny nr 2. Aby otrzymać całkowite prawdopodobieństwo rejestracji elektronu, musimy

146 Charakter praw fizycznych

obliczyć kwadrat sumy obu amplitud. Dokładnie naśladowujemy tutaj opis interferencji fal; skoro mamy otrzymać taką samą krzywą, musimy posłużyć się takimi samymi wzorami. Powiniennem sprawdzić jeszcze jeden punkt dotyczący interferencji. Nie powiedziałem dotychczas, co się dzieje, gdy zamknijemy jedną szczelinę. Spróbujmy wyjaśnić, jak powstaje ta interesująca krzywa, zakładając, że elektron przeleciał albo przez jedną szczelinę, albo przez drugą. Zamykamy szczelinę nr 2 i mierzymy liczbę elektronów docierających do detektora przez szczelinę nr 1. Otrzymujemy nieskomplikowaną krzywą  $N^2$ . Możemy również zamknąć szczelinę nr 1 i zmierzyć rozkład elektronów przelatujących przez szczelinę nr 2, dostajemy wtedy krzywą  $N^2$ . Gdy jednak dodamy do siebie te dwie krzywe, nie otrzymamy wyniku takiego samego jak wtedy gdy otwarte są obie szczeliny - nie będzie widać interferencji. Wyjaśnia to ta dziwna formuła matematyczna, która mówi, że prawdopodobieństwo rejestracji jest równe kwadratowi sumy amplitud dla obu szczelin,  $N^2 = (a_1^2 + a_2^2)$ . Nasuwa się pytanie, jak to jest możliwe, że gdy elektrony przelatują przez szczelinę nr 1, mają rozkład  $N^2$ , gdy przelatują przez szczelinę nr 2, mają rozkład  $N^2$ , a gdy otwarte są obie szczeliny, otrzymujemy zupełnie inny rozkład, który nie jest sumą rozkładów dla poszczególnych szczelin. Na przykład, jeśli umieścę detektor w punkcie  $q$ , to gdy otwarte są obie szczeliny, nie zarejestruję praktycznie żadnego elektronu, gdy zamknę szczelinę nr 2 - zarejestruję bardzo wiele elektronów, a gdy zamknę szczelinę nr 1 - zarejestruję kilka elektronów. Gdy zostawię otwarte obie szczeliny, żaden elektron nie dociera do detektora; otwieram elektronom obie drogi, a elektrony przestają nadlatywać. Możemy również wybrać punkt w środku, między dwoma szczelinami. Łatwo pokazać, że maksimum rozkładu jest wyższe niż suma dwóch krzywych otrzymanych, gdy otwarta jest tylko jedna szczelina. Ktoś mógłby przypuszczać, iż można wymyślić sprytne wyjaśnienie w rodzaju, że elektrony przelatują przez szczeliny tam i z powrotem lub zachowują się w jakiś skomplikowany sposób, czy też dzielą się na połowy, które przelatują przez obie szczeliny. Jednak ostateczny wynik jest tak prosty matematycz-

Prawdopodobieństwo i niepewność 147

POCISKI

FALE WODNE

ELEKTRONY (FOTONY)

dyskretne

mierzymy

prawdopodobieństwo

trafienia

$N^2 = N; +N^2$

brak interferencji

ciągłe

mierzymy

nateżenie fali

$\int I^2 / I_0^2$

interferencja

dyskretne

mierzymy

prawdopodobieństwo

rejestracji

$N^2 \cdot N^2$ ,

interferencja

nie i krzywa jest tak prosta (ryc. 6.3), że nikomu nie udało się tu znaleźć zadowalającego wyjaśnienia.

Podsumowując, można powiedzieć, że elektrony docierają do detektorów w całości, tak jak pociski, ale prawdopodobieństwo rejestracji elektronów jest określone takim wzorem jak nateżenie fali. W tym sensie elektron zachowuje się jednocześnie jak cząstka i jak fala. Elektron jest równocześnie falą i cząstką (por. tabela powyżej).

To wszystko, co należy powiedzieć o tym zjawisku. Mógłbym jeszcze podać matematyczne wzory, określające prawdopodobieństwo rejestracji elektronów w dowolnych okolicznościach, i to w zasadzie byłoby odpowiednie zakończenie wykładu, lecz opisane działanie natury kryje w sobie kilka subtelności. Mamy tu do czynienia z paroma osobliwościami, które chciałbym jeszcze omówić, ponieważ łatwo nie zwrócić na nie uwagi.

Zacznijmy od pewnego twierdzenia, które zapewne wszystkim wyda się rozsądne, ponieważ mamy tu do czynienia z obiektami skupionymi w niewielkiej objętości. Z uwagi na to, że zawsze mamy do czynienia z całym elektronem, można rozsądnie przypuszczać, iż elektron przelatuje albo przez szczelinę nr 1, albo przez szczelinę nr 2. Ponieważ zamierzam omówić to twierdzenie, muszę je najpierw jakoś nazwać. Niech to będzie "twierdzenie A".

Twierdzenie A

Elektron przelatuje albo przez szczelinę nr 1, albo przez szczelinę nr 2.

#### 148 Charakter praw fizycznych

W istocie już rozważaliśmy to twierdzenie. Gdyby było prawdą, że elektron przelatuje albo przez szczelinę nr 1, albo przez szczelinę nr 2, to całkowitą liczbę rejestrowanych elektronów można by przedstawić w postaci sumy dwóch wkładów.

Całkowita liczba elektronów byłaby równa liczbie elektronów, które przeleciały przez szczelinę nr 1, plus liczba elektronów, które przeleciały przez szczelinę nr 2. Przeprowadziliśmy doświadczenie i zmierzaliśmy liczbę rejestrowanych elektronów, gdy otwarta jest tylko jedna z dwóch szczelin. Okazało się, że rozkład elektronów, gdy otwarte są obie szczeliny, nie jest sumą rozkładów otrzymanych dla pojedynczych szczelin. Rozkładu elektronów nie można przedstawić w postaci sumy dwóch wkładów, a zatem musimy dojść do wniosku, że twierdzenie A jest fałszywe. To nieprawda, że elektron musiał przelecieć albo przez

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)

szczelinę nr 1, albo przez szczelinę nr 2. Być może elektron tymczasowo się rozdważy lub robi jeszcze coś innego. Twierdzenie A jest fałszywe. To wynika z logiki. Niestety, lub na szczęście, możemy sprawdzić to wnioskowo eksperymentalnie. Musimy sprawdzić, czy jest prawdą, że elektrony przelatują albo przez jedną, albo przez drugą szczelinę, czy też może się rozdważają, krążą przez obie szczeliny, czy też jeszcze coś innego. W tym celu wystarczy, byśmy obserwowali elektrony. Do tego potrzebujemy światła. Wobec tego obok szczelin umieszczamy mocne źródło światła. Elektrony rozpraszają światło, zatem jeśli wiązka światła jest dostatecznie jasna, możemy zobaczyć przelatujące elektrony. Sprawdzimy teraz, czy tuż przedtem, nim detektor zarejestruje elektron, zobaczymy błysk światła sygnalizujący przelot elektronu przez szczelinę nr 1 lub nr 2. A może zobaczymy coś w rodzaju dwóch błysków o mniejszej jasności, gdy elektron przelatuje przez obie szczeliny? Teraz przekonamy się, jak naprawdę porusza się elektron. Włączamy światło i - proszę bardzo - przekonujemy się, że ilekroć detektor rejestruje elektron, widzimy błysk światła przy jednej ze szczelin. Gdy patrzymy, okazuje się, że elektron przelatuje w całości przez jedną szczelinę. Mamy zatem paradoks! Spróbujmy nieco przycisnąć naturę. Zaraz powiem, co zrobimy. Zostawimy światło włączone i będziemy liczyć nadla-

Prawdopodobieństwo i niepewność 149

tujące elektrony. Przygotujemy dwie kolumny, jedną dla szczeliny nr 1, drugą dla szczeliny nr 2, i gdy detektor zarejestruje elektron, będziemy zaznaczać, przez którą szczelinę przeleciał. Gdy zbierzemy teraz wyniki dla elektronów, które przeleciały przez szczelinę nr 1, jak wygląda rozkład ich liczby w zależności od położenia detektora? Jaki rozkład zobaczą za szczeliną nr 1? Dokładnie taki jak krzywa TV] na rycinie 6.3. Rozkład jest dokładnie taki, jaki otrzymaliśmy, gdy szczelina nr 2 była zamknięta, niezależnie od tego, że wtedy nie przyglądaliśmy się elektronom. Gdy szczelina nr 2 jest zamknięta, otrzymujemy taki sam rozkład elektronów jak wtedy, gdy obserwujemy elektrony przelatujące przez szczelinę nr 1. Podobnie gdy obserwujemy elektrony przelatujące przez szczelinę nr 2, otrzymujemy krzywą  $N^{\wedge}$ , taką samą, jakby zamknięta była szczelina nr 1. Teraz całkowita liczba rejestrowanych elektronów musi być równa  $A^{\wedge} + N^{\wedge}$ , gdyż każdy z tych elektronów został zaobserwowany, jak przelatywał albo przez szczelinę nr 1, albo przez szczelinę nr 2. Całkowita liczba zarejestrowanych elektronów bezwzględnie musi być równa sumie tych dwóch liczb. Ich rozkład musi być równy  $A^{\wedge} + A^{\wedge}$ . Ale przecież powiedziałem wcześniej, że rozkład elektronów przedstawia krzywa  $N^{\wedge}$ . Nie, teraz rozkład wygląda jak  $A^{\wedge} + N^{-\wedge}$ . Tak jest naprawdę, tak być musi, i rzeczywiście tak jest. Jeśli zaznaczymy primami wyniki otrzymane, gdy włączone jest światło, to przekonamy się, że praktycznie  $N^{-\wedge}$  nie różni się od  $A^{\wedge}$ , a  $N^{\wedge}$  od  $N^{-\wedge}$ . Natomiast rozkład  $N^{\wedge}$ , który obserwujemy, gdy światło jest włączone i obie szczeliny są otwarte, równy jest sumie rozkładów elektronów, które widzieliśmy, jak przelatują przez szczelinę nr 1, i elektronów, które widzieliśmy, jak przelatują przez szczelinę nr 2. Taki wynik dostajemy, gdy światło jest włączone. Gdy światło jest wyłączone, otrzymujemy inny wynik. Jeśli światło jest włączone, rozkład jest dany krzywą  $N^{\wedge} + N^{-\wedge}$ . Gdy światło jest wyłączone, dostajemy rozkład  $N^{\wedge}$ . Włączamy światło, i oto znów mamy  $N^{\wedge} + A^{\wedge}$ . Jak widzicie, natura się wykręciła! Moglibyście powiedzieć, że to światło wpływa na wyniki pomiarów. Gdy światło jest włączone, dostajemy inne wyniki, niż gdy jest wyłączone. Moglibyście również powiedzieć, że świa-

150 Charakter praw fizycznych

tło wpływa na zachowanie elektronów. Jeśli zaczniecie analizować mch elektronów w doświadczeniu, co jest nieco niewłaści-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)

we, to moglibyście powiedzieć, że światło wpływa na mch, a zatem te elektrony, które mogłyby dotrzeć do punktu odpowiadającego maksimum rozkładu, w wyniku oddziaływania ze światłem zboczyły z drogi i trafiły do minimum, co spowodowało wygładzenie krzywej i zamiast  $N\lambda + A\lambda$  dostajemy  $N\lambda + A\lambda$ . Elektrony są bardzo delikatne. Gdy patrzymy na piłkę tenisową i oświetlamy ją reflektorem, nie wpływa to na jej ruch, piłka dalej leci po swojej trajektorii. Gdy natomiast oświetlimy elektron, spowoduje to zaburzenie jego ruchu i elektron zachowuje się inaczej, niż zachowywałby się, gdyby nie to silne źródło światła. Przypuśćmy zatem, że stosujemy bardzo czułe detektory fotonów, które rejestrują światło o małym natężeniu, i zmniejszamy jasność źródła światła, tak że jest bardzo ciemne. Nie powinniśmy się spodziewać, by takie słabe światło wpłynęło na elektrony równie silnie jak mocne i spowodowało całkowitą zmianę rozkładu z  $N\lambda$  na  $N\lambda + A\lambda$ . W miarę jak jasność źródła maleje, rozkład powinien zbliżać się do rozkładu, jaki otrzymaliśmy, gdy światło było całkowicie wyłączone. W jaki sposób jedna krzywa przechodzi w drugą? Trzeba jednak pamiętać, że światło różni się od fal wodnych. Światło również składa się z cząstek, tak zwanych fotonów. Gdy zmniejszamy jasność źródła, energia każdego fotonu pozostaje taka sama, maleje tylko ich liczba. Gdy przykręcam światło, dostaję coraz mniej fotonów. W każdym oddziaływaniu z elektronem bierze udział jeden foton, gdy zatem mam za mało fotonów, niektóre elektrony przeleciają wtedy, gdy w pobliżu nie ma żadnego fotonu, a wówczas ich nie widzę. Bardzo słabe źródło światła nie oznacza zatem, że zaburzenie ruchu pojedynczego elektronu jest małe, a tylko tyle, że mam mało fotonów. W tej sytuacji muszę sporządzić trzecią kolumnę, oznaczoną "nie widziałem". Gdy źródło światła jest bardzo jasne, kolumna ta jest niemal pusta; gdy źródło jest bardzo słabe, niemal puste są pozostałe dwie kolumny. Mamy zatem trzy kolumny: "szczelina nr 1", "szczelina nr 2" i "nie widziałem". Domyślcie się zapewne, co się dzieje. Te elektrony, które widziałem, mają rozkład  $N\lambda + N\lambda$ . Te, których nie widziałem, są

#### Prawdopodobieństwo i niepewność 151

rozłożone zgodnie z krzywą  $N\lambda$ . W miarę jak jasność światła staje się coraz mniejsza, coraz więcej elektronów przemyka się przez szczeliny, unikając obserwacji. Rzeczywisty rozkład jest mieszaniną obu rozkładów, tak że w miarę jak jasność źródła maleje, rozkład zbliża się do krzywej  $N\lambda$  w ciągły sposób. Nie jestem w stanie omówić wielu różnych sposobów, jakie moglibyście zasugerować, żeby sprawdzić, przez którą szczelinę przeleciał elektron. Okazuje się jednak, iż jest rzeczą niemożliwą tak ustawić światła, aby stwierdzić, przez którą szczelinę przeleciał elektron, nie zaburzając go na tyle, że znika obraz interferencyjny. Nie dotyczy to wyłącznie światła; niezależnie od tego, czym się posłużymy, ze względów zasadniczych jest to niemożliwe. Jeśli ktoś chce, może wymyślić wiele sposobów na stwierdzenie, przez którą szczelinę przeleciał elektron, a wtedy okazuje się, iż rzeczywiście przeleciał albo przez jedną, albo przez drugą. Jeśli jednak ktoś zechce przeprowadzić ten pomiar tak, aby nie zaburzyć ruchu elektronu, to okazuje się, że nie może stwierdzić, przez którą szczelinę przeleciał elektron, i otrzymuje wtedy skomplikowany rozkład rejestrowanych cząstek.

Gdy Heisenberg odkrył prawa mechaniki kwantowej, zauważył, że ich wewnętrzna spójność wymaga, aby istniało pewne podstawowe ograniczenie dokładności możliwych pomiarów, z którego wcześniej fizycy nie zdawali sobie sprawy. Innymi słowy, nie można przeprowadzić eksperymentu z taką dokładnością, jaką sobie wymarzymy. Heisenberg sformułował zasadę nieoznaczoności, która w wersji zaadaptowanej do naszego doświadczenia wygląda następująco. (Heisenberg podał inne, w pełni równoważne sformułowanie). "Jest rzeczą niemożliwą skonstruować aparat pozwalający określić, przez któ-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
rą szczelinę przeleciał elektron, nie zaburzając przy tym jego ruchu na tyle, że spowodowałoby to zniszczenie obrazu interferencyjnego". Nikomu jeszcze nie udało się ominąć takiego ograniczenia. Jestem pewny, że wszyscy macie już w głowach pomysły, jak stwierdzić, przez którą szczelinę przeleciał elektron, ale jeśli uważnie je przeanalizujecie, przekonacie się, iż są błędne. Możecie sobie wyobrazić, że da się to zrobić bez zabu-

#### 152 Charakter praw fizycznych

rzania ruchu elektronu, ale zawsze się okaże, że była jakaś trudność i że można wyjaśnić zmianę rozkładu elektronów jako konsekwencję zaburzeń spowodowanych przez instrumenty użyte do określenia, przez którą szczelinę przeleciał elektron. Jest to podstawowa reguła natury, która pozwala nam powiedzieć coś o każdym zjawisku. Jeśli jutro odkryjemy nową cząstkę elementarną, kaon - w rzeczywistości kaony już zostały odkryte, ale by jakoś nazwać nową cząstkę, skorzystam z tej nazwy - i wykorzystam oddziaływania kaonów z elektronami, żeby stwierdzić, przez którą szczelinę przeleciał dany elektron, to z góry wiem - mam nadzieję - dostatecznie dużo o zachowaniu kaonów, by powiedzieć, że ich oddziaływania z elektronami nie pozwolą zidentyfikować szczeliny bez jednoczesnego zaburzania ruchu elektronu do tego stopnia, iż spowoduje to zniknięcie obrazu interferencyjnego. Zasada nieoznaczoności jest ogólną zasadą, pozwalającą na przewidzenie wielu cech nieznanymi obiektów. Cechy te muszą być zgodne z zasadą nieoznaczoności. Wróćmy do naszego twierdzenia A: "Elektrony muszą przelecieć albo przez jedną szczelinę, albo przez drugą". Czy to prawda, czy nie? Fizycy mają swoje sposoby na unikanie takich pułapek. Przyjęli oni następujące reguły myślenia. Jeśli masz aparat pozwalający określić, przez którą szczelinę przeleciał elektron (a to jest możliwe), to wtedy wolno powiedzieć, że elektron przeleciał albo przez jedną szczelinę, albo przez drugą, i tak jest rzeczywiście. Gdy obserwujemy, elektron zawsze przeleci przez określoną szczelinę. Gdy jednak nie mamy żadnego instrumentu, pozwalającego stwierdzić, przez którą szczelinę przeleciał elektron, wówczas nie można twierdzić, że wprawdzie nie wiemy, przez którą szczelinę przeleciał elektron, ale z pewnością przeleciał albo przez jedną, albo przez drugą. (Zawsze można to powiedzieć, pod warunkiem że się natychmiast o tym zapomni i nie wyciągnie z tego żadnych wniosków. Fizycy wolą tego nie mówić i nie rezygnować z myślenia). Jeśli przyjmujemy, że elektron przeleciał albo przez jedną, albo przez drugą szczelinę, gdy tego nie zaobserwowaliśmy, doprowadzi to do błędnych przewidywań. Dokonujemy tu logicznych akrobacji, ale musimy się na to odważyć, aby zrozumieć naturę.

#### Prawdopodobieństwo i niepewność 153

Twierdzenie, o którym mówię, ma bardzo ogólny charakter. Nie dotyczy ono tylko doświadczenia z dwiema szczelinami, ale można je sformułować następująco. Prawdopodobieństwo dowolnego zdarzenia w idealnym doświadczeniu - to znaczy w takim, w którym wszystko jest określone z maksymalną dopuszczalną dokładnością - jest równe kwadratowi pewnej wielkości, którą nazwałem tu amplitudą prawdopodobieństwa. Jeśli dane zdarzenie może nastąpić na wiele alternatywnych sposobów, to amplituda prawdopodobieństwa, owa liczba  $a$ , jest równa sumie amplitud prawdopodobieństwa dla każdej z tych możliwości. Natomiast jeśli doświadczenie pozwala na określenie, która z możliwości została rzeczywiście wybrana, to prawdopodobieństwo zdarzenia jest równe sumie prawdopodobieństw dla każdej z możliwości. Oznacza to, że w takim przypadku znikają efekty interferencyjne. Nasuwa się pytanie, jaki jest fizyczny mechanizm tego zjawiska. Jaki proces powoduje, że znika interferencja i musimy przejść od amplitud prawdopodobieństwa do samych prawdo-



Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
podobieństw? Nikt nie jest w stanie podać głębszego wyjaśnienia, niż ja to uczyniłem. Nikt nie wie, jak opisać ten proces. Można podać bardziej obszerne wyjaśnienie, to znaczy opisać więcej przykładów wskazujących, iż jest rzeczą niemożliwą określić, bez naruszenia przy tym obrazu interferencyjnego, przez którą szczelinę przeleciał elektron. Można również opisać inne doświadczenia, nie ograniczając się tylko do eksperymentu z dwiema szczelinami. W ten sposób jednak powtarza się wciąż to samo. Takie wyjaśnienia nie są wcale głębsze, a tylko bardziej obszerne. Można zwiększyć matematyczną precyzję, wspomnieć o konieczności zastosowania liczb zespolonych zamiast rzeczywistych oraz poruszyć kilka drobniejszych problemów, które nie mają nic wspólnego z zasadniczym problemem. Główną tajemnicę mechaniki kwantowej już tu przedstawiłem i nikt nie potrafi posunąć się głębiej. Dotychczas zajmowaliśmy się prawdopodobieństwem zarejestrowania elektronu w danym punkcie. Czy istnieje jakiś sposób, żeby określić, gdzie naprawdę dociera dany elektron? Rzecz jasna, nie mam nic przeciw zastosowaniu teorii prawdo-

#### 154 Charakter praw fizycznych

podobieństwa w skomplikowanych sytuacjach. Gdy rzucamy kostkę, wiemy, że na jej ruch wpływa tarcie w powietrzu, ruchy atomów i wiele innych złożonych czynników, przeto bez trudu gotowi jesteśmy przyznać, że wiemy zbyt mało, aby przewidzieć, jaki numer wypadnie. wobec tego liczymy prawdopodobieństwo otrzymania takiego czy innego wyniku. Tutaj jednak proponujemy przyjęcie czegoś innego - że musimy zastosować teorię prawdopodobieństwa nie z powodu niewiedzy lub złożoności problemu, lecz dlatego, iż fundamentalne prawa fizyczne mają charakter probabilistyczny. Przypuśćmy, że w naszym eksperymencie źródło światła jest wyłączone, a zatem możliwa jest interferencja. Teraz nawet gdybym włączył światło, nie mógłbym przewidzieć, przez którą szczelinę przeleci elektron. Wiem tylko, że zawsze będę widział, jak elektron przelatuje przez którąś szczelinę, natomiast w żaden sposób nie mogę przewidzieć, która to będzie. Innymi słowy, przyszłość jest nieprzewidywalna. Nie można w żaden sposób przewidzieć, niezależnie od posiadanej informacji, przez którą szczelinę przeleci elektron i gdzie zostanie zaobserwowany. Jeśli oryginalnym celem fizyki było - a wszyscy sądzili, że tak właśnie było - poznanie praw, które pozwalają w danej sytuacji przewidzieć, co stanie się dalej, to w pewnym sensie fizycy skapitulowali. Oto nasza sytuacja: źródło elektronów, silne źródło światła, płyta z wolframu z dwiema szczelinami. Proszę mi powiedzieć, za którą szczeliną zobaczę elektron! Zgodnie z pewną teorią nie możemy przewidzieć, przez którą szczelinę przeleci elektron, ponieważ jest to zdeterminowane przez bardzo złożone procesy zachodzące w źródle. Tam znajdują się koła i tryby, które określają, przez którą szczelinę przeleci elektron. Prawdopodobieństwo określonego wyboru wynosi  $1/2$ , ponieważ mechanizm ten, podobnie jak kostka, działa w sposób losowy. Obraz fizyczny procesu jest niepełny. Gdybyśmy znali wszystkie szczegóły, wtedy, podobnie jak w przypadku kostki, moglibyśmy przewidzieć, przez którą szczelinę przeleci elektron. Ta teoria jest znana jako teoria zmiennych ukrytych. Teoria ta nie może być prawdziwa; brak możliwości przewidywania nie wynika z braku szczegółowej wiedzy.

#### Prawdopodobieństwo i niepewność 155

Powiedziałem, że jeśli nie włączyłem źródła światła, to powinienem otrzymać obraz interferencyjny. Jeśli warunki doświadczenia powodują, że widać obraz interferencyjny, to nie można analizować przebiegu doświadczenia, zakładając, że elektron przeleciał albo przez jedną szczelinę, albo przez drugą, ponieważ rozkład prawdopodobieństwa rejestracji w przy-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)

padku interferencji jest prosty, lecz w sensie matematycznym odmienny od rozkładu, jaki otrzymujemy, gdy jedna szczelina jest zamknięta. Gdyby było możliwe określenie, gdzie znajdziemy elektron, jeśli włączymy światło, kwestia, czy światło jest włączone, czy nie, nie miałaby żadnego znaczenia. Gdyby w źródle działały jakieś mechanizmy, jakich poznanie pozwoliłoby nam przewidzieć, przez którą szczelinę przeleci elektron, moglibyśmy zaobserwować skutki ich działania również wtedy, gdy światło jest wyłączone. Gdybyśmy mogli przewidzieć, przez którą szczelinę przeleci elektron, rozkład wyników byłby sumą rozkładów otrzymanych dla elektronów przelatujących przez jedną ze szczelin, a tak nie jest. Wobec tego jest rzeczą niemożliwą, byśmy mogli zdobyć informacje pozwalające z góry powiedzieć, przez którą szczelinę przeleci elektron, niezależnie od tego, czy światło jest włączone, czy nie, w dowolnym doświadczeniu, w którym możemy zaobserwować obraz interferencyjny, o ile światło jest wyłączone. To nie nasza niezajomość wewnętrznych mechanizmów i komplikacji powoduje, że znane nam prawa natury mają probabilistyczny charakter. To cecha samej natury. Ktoś ujął to następująco: "Sama natura nie wie, którą drogę wybierze elektron". Pewien filozof powiedział kiedyś, że "warunkiem koniecznym istnienia nauki jest to, żeby te same warunki prowadziły zawsze do takich samych skutków". Ale tak nie jest! Przygotowujemy eksperyment, za każdym razem warunki są takie same, a mimo to nie możemy przewidzieć, za którą szczeliną zaobserwujemy elektron. Nauka się od tego nie zawaliła, choć tutaj takie same warunki nie prowadzą do takich samych skutków. Bardzo nas martwi to, że nie potrafimy dokładnie przewidzieć, co się stanie w naszym doświadczeniu. Nawiasem mówiąc, można wymyślić niebezpieczną i groźną sytuację, w której

156 Charakter praw fizycznych

człowiek musi wiedzieć, co się stanie, a mimo to nie może nic przewidzieć. Na przykład, moglibyśmy tak zaaranżować sytuację - lepiej tego nie róbmy, choć to możliwe - że jeśli elektron przeleci przez szczelinę nr 1, to wybuchnie bomba atomowa i rozpocznie się trzecia wojna światowa, a jeśli przeleci przez szczelinę nr 2, to wysuniemy propozycje pokojowe i wojna się odwlece. Wtedy przyszłość ludzkości zależałaby od zdarzenia, którego nie można przewidzieć w żaden naukowy sposób. Przyszłość jest nieprzewidywalna. Jakie są rzeczywiście "warunki konieczne istnienia nauki" i jakie są cechy natury, tego nie można określić, deklarując pompatycznie swoje przesady. To wynika zawsze z charakteru rzeczy, które badamy, z samej natury. Badamy, patrzymy, co znajdujemy i nie możemy z góry trafnie przewidzieć, jak to będzie wyglądało. Nawet najbardziej rozsądne możliwości nie są czasem realizowane. Dla rozwoju nauki konieczna jest swoboda eksperymentowania, uczciwość w przedstawianiu wyników - rezultaty muszą być publikowane bez nadzoru osoby, która mówi, jakich wyników oczekuje - oraz, co bardzo ważne, inteligencja potrzebna do ich analizy. Istotne jest także, aby ta inteligencja nie upierała się z góry, że z całą pewnością wie, jak wygląda rzeczywistość. Przesady są zresztą dopuszczalne, uczyony może powiedzieć: "To zupełnie nieprawdopodobne, to mi się nie podoba". Przesady są czymś innym niż absolutna pewność. Nie chodzi mi o niezachwiane uprzedzenia, a tylko o pewne przesady. O ile jesteś jedynie uprzedzony, nie ma to istotnego znaczenia, ponieważ jeśli przesąd jest błędny, to nieustanny wzrost liczby dowodów wykazujących jego błędność będzie cię denerwował tak bardzo, że w końcu nie będziesz mógł ich dłużej lekceważyć. Możesz nie zwracać na nie uwagi tylko wtedy, jeśli jesteś z góry absolutnie pewny, że nauka musi spełniać pewne warunki. W istocie warunkiem koniecznym istnienia nauki jest istnienie umysłów, które nie zakładają, że nauka musi spełniać jakiegokolwiek przyjęte z góry warunki, ta-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
kie jak ten, który sformułował ów filozof.

Poszukiwania  
nowych praw

W tym wykładzie, ściśle mówiąc, nie będę zajmował się charakterem praw fizycznych. Można sobie wyobrazić, że gdy ktoś mówi o prawach fizycznych, mówi równocześnie o naturze, natomiast ja nie chcę tu zajmować się naturą, lecz raczej naszym obecnym stanowiskiem wobec natury. Chcę opowiedzieć o tym, co - jak uważamy - już wiemy, co jest jeszcze do odgadnięcia i jak to próbujemy zrobić. Ktoś zasugerował, że byłoby idealnie, gdybym na przykład wyjaśnił, jak odkrywa się nowe prawo, i na koniec rzeczywiście to zademonstrował. Nie wiem, czy będę w stanie to zrobić. Najpierw chciałbym przedstawić obecną sytuację, powiedzieć, co już wiemy o fizyce. Być może myślicie, że już wszystko powiedziałem, ponieważ w tych wykładach mówiłem o wszystkich wielkich zasadach, które znamy. Jednak zasady muszą czegoś dotyczyć. Zasada zachowania energii dotyczy energii jakichś ciał fizycznych. Prawa mechaniki kwantowej rządzą jakimiś układami fizycznymi. Wszystkie te zasady nie mówią, jak wygląda sama natura, o której mowa. Teraz zatem poświęcę kilka słów właśnie temu, czego te wszystkie zasady dotyczą.

Przede wszystkim istnieje materia. Interesujące, że we wszystkich obszarach wszechświata materia jest taka sama. Materia, z której zbudowane są gwiazdy, to ta sama materia, z jaką mamy do czynienia na Ziemi. Światło emitowane przez gwiazdy stanowi coś w rodzaju odcisków palców, które pozwalają stwierdzić, że istnieją tam takie same atomy jak na Ziemi. Takie same atomy można znaleźć w żywych organizmach i w materii nieożywionej. Żaby są zrobione z tego samego surowca co skały; różnią się od nich tylko strukturą

158 Charakter praw fizycznych

i uporządkowaniem atomów. To ułatwia nasze zadanie: mamy do czynienia wyłącznie z atomami, wszędzie takimi samymi. Wszystkie atomy są zbudowane z takich samych elementów składowych. Każdy ma jądro, wokół którego krążą elektrony. Możemy sporządzić listę znanych nam "cegiełek", z których zbudowany jest świat.

elektrony                    neutrony  
fotony                        protony  
grawitony  
neutrino

+ antycząstki

Pierwsze miejsce na liście zajmują elektrony, cząstki tworzące zewnętrzną "powłokę" atomu. Dalej mamy jądra, ale dziś wiemy, że są one zbudowane z neutronów i protonów - cząstek elementarnych. Gwiazdy i atomy widzimy dzięki temu, że emitują one światło, natomiast światło składa się z cząstek zwanych fotonami. W pierwszym wykładzie mówiłem o grawitacji. Jeśli mechanika kwantowa jest poprawna, to istnieją cząstki - grawitony - które czasem zachowują się jak fale grawitacyjne, a czasem jak korpuskuły. Jeśli w to nie wierzycie, to po prostu przyjmijcie, że istnieje grawitacja. Wspomniałem również, że istnieją słabe oddziaływania jądrowe, odpowiedzialne za rozpad beta: rozpad neutronu na proton, elektron i neutrino, a właściwie antyneutrino. Oprócz tych cząstek istnieją oczywiście ich antycząstki. Za pomocą tego krótkiego stwierdzenia załatwiamy fakt, że lista cząstek jest w istocie dwa razy dłuższa, co jednak nie powoduje żadnych komplikacji.

O ile wiemy, za pomocą wymienionych tu cząstek można wyjaśnić wszystkie zjawiska zachodzące w obszarze niskich energii, czyli wszystkie zwyczajne procesy zachodzące w całym wszechświecie. Zdarzają się wyjątki, gdy jakaś wysokoenerge-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
tyczna cząstka powoduje pewne egzotyczne zjawiska; również w laboratorium prowadzimy doświadczenia, w których badamy bardzo osobliwe procesy; ale jeśli pominiemy te szczególne przypadki, to pozostaną zwyczajne zjawiska, które można

Poszukiwania nowych praw 159

objaśniać jako konsekwencje ruchu i oddziaływań tych cząstek. Na przykład życie można w zasadzie wyjaśnić, odwołując się do ruchu atomów, które są zbudowane z protonów, neutronów i elektronów. Muszę od razu przyznać, że gdy mówię, iż życie można "w zasadzie" zrozumieć, oznacza to tylko, że moim zdaniem, gdybyśmy potrafili dokładnie wszystko zbadać, okazałoby się, że do wyjaśnienia życia nie są potrzebne żadne nowe zasady fizyczne. Innym przykładem jest promieniowanie gwiazd: jest ono zapewne skutkiem reakcji jądrowych zachodzących w ich wnętrzu. O ile obecnie wiemy, model ten umożliwi wyjaśnienie najróżniejszych szczegółów zachowania atomów. W istocie mogę powiedzieć, że wśród znanych dziś zjawisk nie ma żadnego, co do którego bylibyśmy pewni, że nie można go wyjaśnić w ten sposób, a nawet że kryje się w nim jakaś głęboka tajemnica.

Nie zawsze było to możliwe. Znamy na przykład zjawisko nadprzewodnictwa, które polega na tym, że w niskiej temperaturze oporność elektryczna wielu metali spada do zera. Początkowo nie było oczywiste, że takie zachowanie metali jest konsekwencją znanych praw. Teraz, gdy już to zjawisko dokładnie przemyśleliśmy, wiemy, że można je w pełni wyjaśnić, odwołując się do naszej obecnej wiedzy. Są inne zjawiska, takie jak percepcja pozazmysłowa, których nie można wyjaśnić, opierając się na znanych nam prawach fizycznych. Jednak takie zjawiska nie zostały potwierdzone i nie mamy pewności, czy w ogóle zachodzą. Gdyby można było wykazać, że jednak tak, stanowiłoby to dowód niekompletności fizyki. Z tego powodu fizycy bardzo chcieliby wiedzieć, czy zjawisko percepcji pozazmysłowej rzeczywiście zachodzi. Znamy wiele doświadczeń, które wskazują, że taka percepcja jest niemożliwa. To samo można powiedzieć o astrologii. Gdyby było prawdą, że gwiazdy wpływają na to, jaki dzień nadaje się na wizytę u dentysty - a w Ameryce astrologi udzielają takich porad - fizyka okazałaby się błędna. Nie istnieje bowiem żaden mechanizm, którego działanie można by choćby w zasadzie zrozumieć, odwołując się do koncepcji cząstek, umożliwiającej tego rodzaju oddziaływania między gwiazdami i ludźmi.

160 Charakter praw fizycznych

Z tego powodu naukowcy odnoszą się dość sceptycznie do takich pomysłów.

Z drugiej strony, hipnoza również początkowo wydawała się niemożliwa. Teraz znamy to zjawisko lepiej i nie jest już wykluczone, że hipnoza zachodzi wskutek normalnych, fizjologicznych procesów, których na razie nie rozumiemy. Nie jest oczywiste, że wymaga ona jakichś nowych, specjalnych sił. Obecnie nasza teoria zjawisk zachodzących na zewnątrz jądra atomowego wydaje się dostatecznie ścisła i kompletna w tym sensie, że mając dostatecznie dużo czasu, można obliczyć każdy efekt z taką dokładnością, z jaką chcemy go zmierzyć. Natomiast niezbyt dobrze rozumiemy jeszcze siły między protonami i neutronami, z których zbudowane są jądra. Chcę powiedzieć, że nie znamy tych sił na tyle dobrze, bym mógł, jeśli tego sobie zażyczycie i dacie mi dowolnie dużo czasu i wiele komputerów, dokładnie obliczyć poziomy energii jądra węgla lub coś podobnego. Potrafimy obliczyć poziomy energii elektronów na zewnątrz jądra, natomiast nie możemy tego zrobić dla samego jądra, ponieważ nie znamy dostatecznie dobrze oddziaływań jądrowych.

Aby lepiej poznać te siły, fizycy doświadczalni zajęli się ba-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
daniami oddziaływań między cząstkami mającymi bardzo wysoką energię. Analizują oni różne dziwne zjawiska, które zachodzą podczas zderzeń między protonami i neutronami o bardzo wysokiej energii. Te doświadczenia otworzyły istną puszkę Pandory! Choć fizycy chcieli tylko lepiej poznać oddziaływania między protonami i neutronami, badając je odkryli, że istnieje bardzo dużo innych cząstek. W rzeczywistości próby zrozumienia silnych oddziaływań doprowadziły do odkrycia ponad czterech tuzinów nowych cząstek, które należy umieścić w tej samej kolumnie co proton i neutron (zob. tabelę na sąsiedniej stronie), ponieważ oddziałują z nimi i mają coś wspólnego z silnymi oddziaływaniami jądrowymi. Na przykład, gdy pogłębiarka wydobywała to całe błoto, znalazła również dwa kawałki, które nie mają związku z silnymi oddziaływaniami. Są to mezon pi, czyli mion, oraz neutrino mionowe. Zdumiewające, że znamy prawa rządzące zachowaniem

Poszukiwania nowych praw 161

mionu i neutrino mionowego. Na ile potrafimy to sprawdzić na podstawie posiadanych danych doświadczalnych, mion i neutrino mionowe zachowują się dokładnie tak samo jak elektron i neutrino elektronowe, z jedną różnicą - mion ma masę 207 razy większą niż elektron. Jest to jedyna znana różnica między tymi obiektami, co jest raczej dziwne. Cztery tuziny cząstek to przerażający zbiór, a są jeszcze ich antycząstki. Są to mezony, piony, kaony, cząstki lambda, sigma... Cóż, skoro mamy tyle cząstek, to musi być dużo nazw! Okazuje się jednak, że cząstki te tworzą rodziny, co stanowi pewną pomoc. Niektóre z tych cząstek mają tak krótki czas życia, że można debatować, czy należy w ogóle mówić o ich istnieniu, ale nie chciałbym tu wdawać się w taką dyskusję.

elektrony

fotony

grawitony

neutrino

neutrony

protony

(+ ponad 4 tuziny cząstek)

miony

neutrino mionowe 1

+ wszystkie antycząstki

Chciałbym zilustrować ideę rodzin cząstek na przykładzie protonu i neutronu. Neutron i proton mają prawie takie same masy - różnica jest mniejsza niż jedna dziesiąta procent. Masa protonu jest 1836 razy większa od masy elektronu, a masa neutronu 1839 razy. Jeszcze bardziej interesujący jest fakt, że siły jądrowe między dwoma protonami są takie same jak między dwoma neutronami oraz między protonem i neutronem. Inaczej mówiąc, z punktu widzenia oddziaływań jądrowych proton i neutron są nieodróżnialne. Mamy zatem prawo symetrii: neutrony można zastąpić protonami i nic to nie zmieni - oczywiście, jeśli mówimy wyłącznie o oddziaływaniach silnych. Gdybyśmy rzeczywiście zastąpili neutron protonem, spowodowałoby to poważne zmiany, ponieważ proton ma ładunek elektryczny, a neutron jest obojętny. Wykonując pomiary elektryczne, możemy natychmiast odróżnić proton od neu-

162 Charakter praw fizycznych

tronu, a zatem ta symetria, możliwość zastępowania protonów neutronami, jest tylko przybliżona. Symetria ta obowiązuje w silnych oddziaływaniach, ale nie w oddziaływaniach elektromagnetycznych. W przyszłości jeszcze będziemy się męczyć z takimi symetriami. Rozszerzenie rodzin cząstek było możliwe, ponieważ okazało się, że możliwość zastąpienia jednej cząstki inną nie dotyczy tylko protonu i neutronu, ale również pozostałych czą-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
stek. Jednak dokładność tej symetrii jest jeszcze mniejsza. Stwierdzenie, że proton można zastąpić neutronem, jest tylko w przybliżeniu słuszne - pomija bowiem oddziaływania elektromagnetyczne - ale znalezione bardziej ogólne reguły podstawiania określają jeszcze bardziej przybliżoną symetrię. Ta przybliżona symetria pomogła nam jednak pogrupować cząstki w rodziny i stwierdzić, których z nich wciąż brakuje, co ułatwiło ich poszukiwania.

Ta gra, polegająca na odgadywaniu związków rodzinnych między cząstkami, jest przykładem wstępnych harców, jakie uprawiają z naturą uczeni, nim odkryją naprawdę głębokie, podstawowe prawo. W historii nauki można znaleźć ważne przykłady takich odkryć. Podobne znaczenie miało osiągnięcie Mendelejewa<sup>19</sup>, który stworzył okresowy układ pierwiastków. To był pierwszy krok, ale układ okresowy udało się w pełni zrozumieć znacznie później, gdy powstała kwantowa teoria atomu. Podobnie Maria Mayer i Hans Jensen<sup>20</sup> kilka lat temu zaproponowali powłokowy model jądra atomowego, który pozwolił uporządkować naszą znajomość poziomów energii w jądrach. W fizyce toczy się obecnie analogiczna gra, w której chodzi o zredukowanie złożoności za pomocą przybliżonych reguł.

Oprócz tych cząstek mamy wszystkie zasady, o których mówiliśmy wcześniej, prawa symetrii, zasadę względności oraz re-

<sup>19</sup> Dymitr Iwanowicz Mendelejew (1834-1907) - rosyjski chemik.  
<sup>20</sup> Maria Mayer, amerykański fizyk, profesor fizyki Uniwersytetu Kalifornijskiego od 1960 roku, laureatka Nagrody Nobla w 1963 roku. Hans Daniel Jensen, niemiecki fizyk, dyrektor Instytutu Fizyki Teoretycznej w Heidelbergu od 1949 roku, laureat Nagrody Nobla w 1963 roku.

Poszukiwania nowych praw 163

guły mechaniki kwantowej. Z teorii względności wynika również, że wszystkie zasady zachowania muszą być lokalne. Gdy łączymy te wszystkie zasady, okazuje się, że jest ich zbyt wiele. Zasady te są ze sobą sprzeczne. Wydaje się, że jeśli połączymy mechanikę kwantową z teorią względności, przyjmujemy, że wszystko musi mieć charakter lokalny i po cichu przyjmujemy jeszcze parę założeń, to popadniemy w sprzeczności. W rezultacie gdy próbujemy obliczać różne wielkości, otrzymujemy nieskończoność, a jak można twierdzić, że nieskończoność zgadza się z naturą? Jednym z takich cichych założeń, o jakich wspominałem, co do których żywimy zbyt silne przekonania, żeby naprawdę zrozumieć ich znaczenie, jest następujące twierdzenie. Suma prawdopodobieństw wszystkich możliwych zdarzeń (powiedzmy 0,5, że zdarzy się to, 0,25, że zdarzy się tamto, i tak dalej) musi być równa 1. Uważamy, że jeśli uwzględnimy wszystkie możliwe ewentualności, to całkowite prawdopodobieństwo, że któraś się zdarzy, musi być równe 100%. To wydaje się rozsądne, ale problemy zawsze zaczynają się od rozsądnych założeń. Podobny charakter ma teza, że energia musi być zawsze dodatnia, a nie ujemna. Zapewne jeszcze nie popadniemy w sprzeczność, przyjmując warunek przyczynowości, który oznacza, że skutki nie mogą wyprzedzać w czasie przyczyn. W rzeczywistości nikt nie skonstruował modelu, który nie uwzględniałby warunku przyczynowości i tezy na temat prawdopodobieństw, lecz był zgodny z zasadami mechaniki kwantowej, teorią względności, postulatem lokalności i tak dalej. W istocie nie wiemy zatem, które z tego rodzaju założeń powodują wystąpienie nieskończoności w obliczeniach. To bardzo ładny problem! Okazuje się jednak, że istnieje pewna dość prymitywna sztuczka, która pozwala ukryć nieskończoności, a zatem jak na razie możemy rachować dalej.

OK, tak wygląda obecna sytuacja. A teraz opowiem, jak szukamy nowych praw.

Ogólnie mówiąc, nowego prawa szukamy w następujący sposób. Wpierw staramy się je odgadnąć. Następnie oblicza-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
my konsekwencje hipotetycznego prawa, aby sprawdzić, czy

164 Charakter praw fizycznych

nasz domysł był słuszny. Wyniki obliczeń porównujemy z rezultatami eksperymentów lub bezpośrednich obserwacji, żeby sprawdzić, czy są zgodne. Jeśli hipoteza nie zgadza się z eksperymentem, jest biedna. To proste stwierdzenie jest kluczem do nauki. Nie ma znaczenia, jak piękna jest twoja hipoteza. Nie ma znaczenia, jaki jesteś bystry ani jak ją nazwiesz; jeśli hipoteza nie zgadza się z wynikami eksperymentu, to jest błędna. To wszystko. Oczywiście, trzeba dokładnie posprawdzać, czy rzeczywiście hipoteza jest błędna, gdyż autor doświadczenia mógł niewłaściwie przedstawić uzyskane wyniki lub może nie wziął pod uwagę pewnych okoliczności, na przykład brudu w aparaturze, czy czegoś takiego. Pomylić się mógł również fizyk, który obliczał konsekwencje wynikające ze sprawdzanej hipotezy, nawet jeśli to był jej autor. Wszystko to są sprawy oczywiste, zatem gdy mówię, że skoro przewidywania nie zgadzają się z eksperymentem, to hipoteza jest fałszywa, zakładam, że doświadczenie i obliczenia zostały sprawdzone, cały problem był parokrotnie zanalizowany dla upewnienia się, że rzeczywiście przewidywania są logiczną konsekwencją hipotezy i naprawdę są sprzeczne z rezultatami starannie przeprowadzonego doświadczenia.

Nie chciałbym, abyście pod wpływem tych słów nabrali niewłaściwego wyobrażenia na temat nauki. Na podstawie tego, co powiedziałem, można dojść do wniosku, że nauka polega na nieustannym formułowaniu hipotez i porównywaniu ich z wynikami doświadczeń, co raczej zaniżyłoby znaczenie eksperymentów. W rzeczywistości fizycy doświadczalni lubią odgrywać niezależną rolę. Często robią doświadczenia, nawet jeśli nikt jeszcze nie sformułował odpowiedniej hipotezy oczekującej sprawdzenia. Bardzo często badają doświadczalnie zjawiska, których jeszcze nie rozważali teoretycy. Na przykład znamy wiele praw rządzących cząstkami elementarnymi, ale nie wiemy, czy obowiązują one również wtedy, gdy cząstki mają bardzo dużą energię; w tej dziedzinie prawa te są tylko hipotezami. Eksperymentatorzy nieustannie próbują zwiększyć energię cząstek używanych w doświadczeniach i od czasu do czasu odkrywają nowe problemy - okazuje się, że prawo,

Poszukiwania nowych praw 165

o którym sądziliśmy, że jest słuszne, prowadzi do błędnych przewidywań. Doświadczenia dają też czasem nieoczekiwane wyniki i wtedy teoretycy muszą znowu zabrać się do odgadywania właściwych praw. Przykładem takiej niespodzianki jest odkrycie mionu i neutrina mionowego. Nie tylko nikt nie podejrzewał istnienia tych cząstek, ale i dziś nikt nie potrafi w naturalny sposób wyjaśnić, skąd się one wzięły.

Jest zapewne dla wszystkich zrozumiałe, że w ten sposób można obalić dowolną teorię prowadzącą do jednoznacznych wniosków. Jeśli mamy jednoznaną teorię, właściwie sformułowaną hipotezę, z której można wyprowadzić przewidywania nadające się do eksperymentalnej weryfikacji, to w zasadzie można ją obalić. Jednoznaną teorię zawsze można obalić; proszę natomiast zauważyć, że nie można udowodnić, iż jest ona prawdziwa. Przypuśćmy, że sformułowaliśmy trafną hipotezę, obliczyliśmy wynikające z niej przewidywania i przekonaliśmy się, że za każdym razem okazują się one zgodne z rezultatami eksperymentów. Czy to już oznacza, że teoria jest prawdziwa? Nie, po prostu nie została obalona. W przyszłości możemy wyprowadzić z niej bardziej ogólne przewidywania, mogą zostać przeprowadzone nowe eksperymenty i wtedy może się okazać, że hipoteza jest błędna. Właśnie dlatego prawo powszechnego ciężenia Newtona obowiązywało tak długo.

Newton sformułował hipotezę na temat praw grawitacji i ru-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
chu, wyprowadził z nich najrozmaitsze przewidywania, które porównał z obserwacjami, i minęło kilkaset lat, nim wreszcie wykryto niewielką sprzeczność między przewidywaniami wynikającymi z jego teorii a faktycznym ruchem Merkurego. Przez ten cały czas teoria Newtona trwała nie obalona i można było sądzić, że przynajmniej tymczasowo jest słuszna. Nigdy jednak nie można udowodnić, że teoria jest prawdziwa, ponieważ wyniki jutrzejszych doświadczeń mogą wykazać, iż hipotezy, które dziś uważamy za prawdziwe, są w istocie fałszywe. Nigdy nie wiemy na pewno, że mamy rację - pewność można uzyskać tylko co do tego, że teoria jest błędna. Jest jednak godne uwagi, że niektóre nasze koncepcje tak długo wydają się słuszne.

#### 166 Charakter praw fizycznych

Jeden ze sposobów na zablokowanie rozwoju nauki polega na prowadzeniu doświadczeń tylko w tej dziedzinie, w której znamy prawa rządzące zjawiskami. Jednak fizycy doświadczalni przeprowadzają eksperymenty z największą pilnością i energią właśnie wtedy, gdy mają największą szansę na wykazanie, że teoria jest błędna. Inaczej mówiąc, usiłujemy jak najszybciej przekonać się, że nie mamy racji, ponieważ tylko to umożliwia postęp. Na przykład w tej chwili nie wiemy, gdzie szukać problemów w dziedzinie zwykłych, niskoenergetycznych procesów, uważamy, że wszystko jest w porządku, a zatem nie istnieje żaden wielki program poszukiwania problemów w fizyce jądrowej lub w dziedzinie nadprzewodnictwa. W tych wykładach mówię głównie o prawach fundamentalnych. Do zakresu zainteresowań fizyki należy również wyjaśnienie takich zjawisk jak nadprzewodnictwo na innym poziomie - przez odwołanie się do praw podstawowych. Teraz jednak mówię o poszukiwaniu problemów, szukaniu niedostatków znanych praw podstawowych, a ponieważ w dziedzinie niskich energii nikt nie wie, gdzie ich szukać, obecnie wszystkie eksperymenty mające na celu odkrycie nowych praw dotyczą zjawisk zachodzących przy bardzo wysokiej energii. Muszę również podkreślić, że nie można obalić niejednoznacznej teorii. Jeśli sformułowana hipoteza jest nieprecyzyjna i raczej luźna, a metoda wyprowadzania przewidywań też jest daleka od ścisłości - gdy autor hipotezy mówi "Myślę, że wszystko jest w porządku, ponieważ to wynika z tego, a tamto zachodzi mniej więcej tak, i mogę z grubsza wyjaśnić, jak to się dzieje..." - to jak wszyscy widzicie, jego teoria jest bardzo dobra, ponieważ nie można jej obalić! Jeśli procedura wyprowadzania przewidywań z teorii nie jest jednoznaczna, to przy odrobinie zręczności można przedstawić dowolne wyniki eksperymentalne jako zgodne z teorią. Zapewne znacie ten mechanizm z innych dziedzin. Osobnik A nienawidzi matki. Oczywiście dlatego, że gdy był dzieckiem, mama nie pieściła go i nie kochała dostatecznie mocno. Jednak po sprawdzeniu okazuje się, że bardzo go kochała, poświęcała mu dużo czasu i wszystko było wspaniałe. No to wobec tego A nienawidzi matki, bo ta

#### Poszukiwania nowych praw 167

była zbyt pobłażliwa. Gdy mamy niejednoznaczna teorię, możemy wyjaśnić dowolny wynik. Jest na to następujące lekarstwo. Gdyby było możliwe określenie z góry, ile miłości jest porcją za małą albo za dużą, mielibyśmy poprawną teorię do zastosowania w testach eksperymentalnych. Gdy ktoś właśnie to mówi, słyszy zazwyczaj w odpowiedzi, że jeśli mamy do czynienia z zagadnieniami psychologicznymi, nie możemy wszystkiego tak ściśle definiować". Zgoda, ale wtedy nikt nie może twierdzić, że wie coś ścisłego o takich sprawach. Z pewnością będziecie zgorszeni słysząc, że w fizyce można również znaleźć przykłady tego samego rodzaju. Mamy przybliżone symetrie, które traktujemy czasem w następujący



Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
sposób. Przyjmujemy, że symetria jest ścisła, po czym wyprowadzamy pewne przewidywania. Porównujemy je z doświadczeniem i oczywiście znajdujemy sprzeczności, ponieważ symetria nie jest ścisła, a tylko przybliżona. Jeśli różnice są niewielkie, mówimy "całe szczęście", a jeśli są duże, stwierdzamy że "wiodocznie mamy do czynienia z efektem, który szczególnie silnie zależy od naruszeń symetrii". Możecie się śmiać, ale właśnie w ten sposób musimy posuwać się naprzód. Gdy mamy do czynienia z nową dziedziną, z nowymi cząstkami elementarnymi, takie odgadywanie reguł stanowi początek prawdziwej nauki. To w równym stopniu dotyczy zasad symetrii w fizyce, jak psychologii, przeto nie śmiejcie się zbyt głośno. Początkowo trzeba bardzo uważać. Bardzo łatwo wpaść w przepaść, jaką jest jednoznaczna teoria, ponieważ trudno wykazać, że jest błędna. Ta gra wymaga zręczności i doświadczenia. W tym procesie formułowania hipotez, wyciągania wniosków i porównywania ich z doświadczeniem możemy utknąć w każdym miejscu. Możemy stanąć na etapie hipotez, gdy nie mamy żadnych pomysłów. Możemy również zatrzymać się z powodu trudności matematycznych z wyprowadzeniem przewidywań z przyjętej hipotezy. Na przykład w 1934 roku Yukawa<sup>21</sup> wysunął pewną hipotezę na temat silnych oddziaływań ją-21 Hideki Yukawa, japoński fizyk. Dyrektor Instytutu Badawczego Fizyki Podstawowej w Kioto, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1949 roku.

168 Charakter praw fizycznych  
drowych, ale nikt nie potrafił obliczyć, co z niej wynika, ponieważ matematyka była zbyt trudna, a zatem nie można było sprawdzić jego koncepcji eksperymentalnie. Teońa ta pozostała w nieokreślonym stanie przez wiele lat, aż wreszcie odkryliśmy te wszystkie nowe cząstki, których Yukawa nie przewidział, co znaczy, że teoria silnych oddziaływań nie jest aż tak prosta, jak on przypuszczał. Można również utknąć na etapie eksperymentalnym. Na przykład, kwantowa teoria grawitacji rozwija się bardzo powoli, o ile w ogóle, ponieważ w żadnym doświadczeniu nie mamy jednocześnie do czynienia z efektami kwantowymi i grawitacyjnymi. Grawitacja jest zbyt słaba, aby można ją było porównać z siłami elektromagnetycznymi. Ponieważ jestem fizykiem teoretykiem, najbardziej interesuje mnie zawsze teoretyczna strona problemu i dlatego teraz chciałbym skupić uwagę na tym, jak formułujemy hipotezy. Jak już powiedziałem, pochodzenie hipotez nie ma znaczenia. Istotne jest tylko to, żeby hipoteza była możliwie jednoznaczna, a jej konsekwencje zgadzały się z doświadczeniem. "Skoro tak - powiadacie - to sprawa jest bardzo prosta. Należy skonstruować maszynę, wielki komputer, wyposażony w losowy generator hipotez. Komputer natychmiast oblicza konsekwencje każdej nowej hipotezy i porównuje je z listą wyników eksperymentalnych". Innymi słowy, formułowanie hipotez to zajęcie dla głupich. W rzeczywistości jest dokładnie odwrotnie, co zaraz postaram się wyjaśnić. Przede wszystkim nie wiadomo, jak zacząć. Powiadacie: "Zacznijmy od wszystkich znanych zasad". Ale wszystkie znane zasady są ze sobą sprzeczne, a zatem z którejś trzeba zrezygnować. Fizycy dostają wiele listów od ludzi, którzy uważają, że wiedzą, co należy odrzucić. Ktoś pisze: "wy, uczeni, zawsze sądzicie, że przestrzeń jest ciągła. Skąd wiecie, że gdy przejdziemy do naprawdę małej skali, punkty są nadal dowolnie gęsto upakowane? A może przestrzeń składa się z wielu dyskretnych punktów?". Inny powiada: "wie pan, te amplitudy kwantowe, o których pan mówił, są takie skomplikowane i absurdalne. Skąd pan wie, że trzeba się nimi posługiwać? Może to błędna koncepcja". Takie uwagi są oczywiste i jasne

Poszukiwania nowych praw 169  
dla wszystkich, którzy zajmują się tymi problemami. Sugestie  
Strona 89

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)

takie nie przynoszą żadnego pożytku. Problem nie polega na wskazaniu, która koncepcja jest zapewne błędna, ale na zastąpieniu jej jakąś inną. Przypuśćmy, że zamiast koncepcji ciągłej przestrzeni przyjmujemy, że przestrzeń ma postać regularnej sieci punktów, a pojęcie przestrzeni między punktami nie ma żadnego sensu. Wtedy można natychmiast udowodnić, że ta idea jest błędna. Nie sprawdza się. Sedno sprawy nie polega na tym, by powiedzieć, że jakaś teoria jest błędna, ale by ją czymś zastąpić - a to wcale nie jest łatwe. Gdy tylko wprowadzamy na miejsce starej jakąś nową teorię, staje się niemal natychmiast oczywiste, że jest ona błędna. Druga trudność wynika z tego, że istnieje nieskończenie wiele prostych możliwości. To wygląda mniej więcej tak. Od dłuższego czasu pracujesz bardzo ciężko, żeby otworzyć sejf. Teraz podchodzi do ciebie jakiś Jasiu, który nie ma zielonego pojęcia o tym, co robisz, wie tylko, że próbujesz otworzyć sejf, i mówi: "Czemu nie spróbujesz kombinacji 10-20-30?". Może jesteś zajęty czymś innym, może już próbowałeś, może wiesz, że środkowe dwie liczby to 32, a nie 20. Może już wiesz, że w rzeczywistości sejf otwiera pięciocyfrowa kombinacja... Proszę mi zatem nie przysyłać listów z sugestiami na temat praw natury. Czytam je - zawsze je czytam, żeby się upewnić, czy to coś istotnie nowego - ale nie mam czasu, żeby na nie odpowiadać, ponieważ są to z reguły rady typu "spróbuj 10-20-30". Zazwyczaj natura góruje nad nami wyobraźnią, co potwierdzają przykłady różnych pięknych i głębokich teorii. Sformułowanie subtelnej i głębokiej hipotezy nie jest łatwe. Wymaga to naprawdę dużej bystrości i z pewnością nie może tego zrobić maszyna działająca przypadkowo. Chciałbym teraz rozważyć, na czym polega sztuka odgadywania praw natury. To naprawdę jest sztuka. Jak się to robi? Ktoś mógłby zaproponować, że można się tego dowiedzieć z historii, sprawdzając, jak robili to inni. Zajmijmy się zatem historią. Musimy zacząć od Newtona. Dysponował on bardzo ograniczoną wiedzą, ale zdołał trafnie sformułować wiele

#### 170 Charakter praw fizycznych

praw, mających dość bliski związek z doświadczeniem. W jego czasach odległość między teorią a eksperymentem była bardzo niewielka. Ten pierwszy sposób dziś raczej się nie sprawdza.

Następnym facetem, który dokonał czegoś wielkiego, był Maxwell. Maxwell podał prawa rządzące elektrycznością i magnetyzmem. Udało mu się to zrobić w następujący sposób. Zebrał wszystkie znane prawa elektryczności i magnetyzmu, które sformułowali Faraday i inni uczeni, po czym dostrzegł, że tkwi w nich matematyczna sprzeczność. Aby usunąć tę sprzeczność, Maxwell wprowadził do jednego z równań nowy wyraz. W swoim rozumowaniu korzystał ze skomplikowanego modelu kół zębatach, które miały się jakoś obracać w przestrzeni. Maxwell odkrył nowe prawo, ale nikt nie zwrócił na to większej uwagi, właśnie dlatego, że uczeni nie wierzyli w owe "tryby". Dziś również nie wierzymy w mechanizm Maxwella, ale jego równania są jak najbardziej poprawne. Zatem wynik może być poprawny, nawet jeśli rozumowanie było błędne. Zupełnie inaczej wyglądało odkrycie teorii względności. W tym przypadku uczeni mieli do czynienia z rosnącą liczbą paradoksów; znane prawa prowadziły do sprzecznych wyników. Odkrycie było wynikiem nowego sposobu rozumowania, polegającego na rozważaniu możliwych symetrii praw fizycznych. Sformułowanie teorii względności było szczególnie trudne, ponieważ fizycy po raz pierwszy musieli zdać sobie sprawę, że nawet jeśli jakaś teoria była uważana za słuszną tak długo jak dynamika Newtona, ostatecznie może okazać się błędna. Trudno było również pogodzić się z faktem, że normalne, intuicyjne rozumienie czasu i przestrzeni jest błędne.

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)

Mechanika kwantowa została odkryta na dwa niezależne sposoby: jest to dla nas ważna lekcja. Również w tym przypadku liczne doświadczenia dawały paradoksalne wyniki, uczeni poznawali zjawiska, których absolutnie nie można było wyjaśnić w żaden znany sposób. Nie chodziło o luki w wiedzy, a raczej o to, że nasze prawa były aż nadto kompletne. Fizycy przewidywali, że coś się powinno zdarzyć - i nic się nie działo. Poprawne sformułowanie mechaniki kwantowej zawdzię-

Poszukiwania nowych praw 171

czarny Schrödingerowi<sup>22</sup>, który odgadł, jak powinno wyglądać odpowiednie równanie, oraz Heisenbergowi, który argumentował, że należy przeanalizować, jakie wielkości są rzeczywiście mierzalne. Te dwie odmienne filozoficznie metody ostatecznie okazały się równoważne.

Jeszcze inaczej wyglądało niedawne odkrycie praw rządzących słabymi oddziaływaniami, które powodują między innymi rozpad neutronu na proton, elektron i antyneutrino. Prawa te wciąż znamy tylko częściowo. Tym razem fizycy również nie dysponowali pełną wiedzą i udało się im odgadnąć właściwe równanie. Szczególna trudność polegała na tym, że wszystkie wyniki eksperymentalne były błędne. Jak można stwierdzić, że udało się odgadnąć właściwe prawo, jeśli przewidywania nie zgadzają się z rezultatami doświadczeń? Do tego konieczna jest odwaga: należy stwierdzić, że eksperymenty z pewnością są błędne. Dalej wyjaśnię, z czego może wynikać taka śmiałość.

Obecnie nie mamy żadnych paradoksów do rozwiązania: tak się przynajmniej wydaje. Istnieje problem tych nieskończoności, które pojawiają się w różnych obliczeniach, ale ludzie nauczyli się tak sprawnie ukrywać różne śmieci, że często myślimy, iż nie jest to poważny problem. Sam fakt, że znaleźliśmy tyle nowych cząstek, mówi nam tylko, że nasza wiedza jest niekompletna. Jestem przekonany, że w fizyce historia się nie powtarza, o czym świadczą powyższe przykłady. Łatwo zrozumieć dlaczego. Wszyscy fizycy znają podstawowe schematy rozumowania, takie jak "pomyśl o prawach symetrii", "sformułuj posiadane informacje w postaci matematycznej" i "odgadnij odpowiednie równanie". Gdy tkwimy w miejscu, rozwiązanie nie może polegać na zastosowaniu jednej z takich metod, ponieważ te metody stosuje się od razu. Za każdym razem należy wymyślić coś nowego. Ilekroć pakujemy się w kłopoty i mamy zbyt wiele problemów do rozwiązania, zawsze jest tak dlatego, że wciąż używamy takich samych metod, jakie okazały się skuteczne w przeszłości. Każde następne odkrycie

<sup>22</sup> Erwin Schrödinger, austriacki fizyk teoretyk. W 1933 roku, wspólnie z Pauliem Dirakiem, otrzymał Nagrodę Nobla z fizyki.

172 Charakter praw fizycznych

wynika z nowych pomysłów. Wobec tego historia niewiele może nam pomóc.

Chciałbym powiedzieć kilka słów o idei Heisenberga, że nie należy posługiwać się wielkościami, których nie można zmierzyć. Wielu ludzi powtarza tę myśl, choć jej naprawdę nie rozumie. Ideę Heisenberga można zinterpretować następująco. Twoje konstrukcje i pomysły muszą mieć taki charakter, żeby wyprowadzone z nich wnioski można było porównać z wynikami doświadczeń. Nie można formułować takich przewidywań, jak "jedno mu to trzy gu", ponieważ nikt nie wie, co to są mu i gu. Rzecz jasna, takie przewidywania byłyby do niczego. Jeśli jednak przewidywania można zweryfikować doświadczalnie, w zupełności to wystarczy. Reguła ta jednak nie wyklucza użycia mu i gu do sformułowania hipotezy. Hipoteza może zawierać dowolną ilość śmieci, pod warunkiem że wynikające z niej przewidywania będą sprawdzalne eksperymentalnie. Nie wszyscy to właściwie rozumieją. Często słyszy się zarzuty, że ktoś bezpodstawnie zastosował pojęcie cząstki

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
lub drogi w dziedzinie atomowej. Nie ma w tym nic złego. Takie rozszerzenie zakresu stosowania pojęcia jest w pełni dopuszczalne. Musimy, powinniśmy, i faktycznie zawsze tak robimy - chcę powiedzieć, że staramy się maksymalnie rozszerzyć zakres stosowania pojęć poza granice tego, co już wiemy, aby wyjść poza idee już sformułowane. Czy to niebezpieczne? Tak. Niepewne? Tak. Ale to jedyny sposób, żeby posuwać się do przodu. Choć takie postępowanie nie daje pewności, jest konieczne, by nauka była użyteczna. Nauka jest przydatna tylko wtedy, gdy mówi nam coś o wynikach doświadczeń, które nie zostały jeszcze przeprowadzone. Jeśli mówi tylko o tym, co już się wydarzyło, to jest do niczego. Musimy ekstrapolować nasze idee poza dziedzinę, w której zostały sprawdzone. Na przykład prawo powszechnego ciążenia, które zostało sformułowane, żeby wyjaśnić ruchy planet, byłoby zupełnie bezużyteczne, gdyby Newton powiedział po prostu: "Teraz rozumiem planety", i nie spróbował zastosować swego prawa do ruchu księżyca odbywającego się pod wpływem ziemskiej grawitacji, a kolejni fizycy nie wpadli na po-

#### Poszukiwania nowych praw 173

mysi, że może to grawitacja utrzymuje galaktyki w całości. Musimy próbować ekstrapolować uzyskane wyniki. Ktoś mógłby powiedzieć, że "nie wiemy nic o układach wielkości galaktyki, a zatem wszystko jest tu możliwe". Wiem, ale przyjęcie takich ograniczeń nie ma nic wspólnego z nauką. To nie pomaga zrozumieć struktury galaktyk. Jeśli natomiast założymy, że można wyjaśnić zachowanie galaktyk przez odwołanie do znanych praw, to takie założenie prowadzi do jednoznacznych przewidywań i może zostać łatwo obalone na podstawie obserwacji. Tego właśnie poszukujemy - jednoznacznych hipotez, które można łatwo zweryfikować doświadczalnie. W rzeczywistości to, co wiemy o zachowaniu galaktyk, wydaje się w pełni zgodne z tym właśnie założeniem. Mogę podać kolejny przykład, być może jeszcze bardziej interesujący i ważny. Zapewne najważniejsze założenie, mające największy wpływ na rozwój biologii, polega na przyjęciu, że wszystko, co potrafią zrobić zwierzęta, potrafią również atomy. To znaczy wszystkie zjawiska biologiczne są konsekwencją procesów fizycznych i chemicznych, które zachodzą bez jakichkolwiek "sił witalnych". Zawsze możecie powiedzieć: "Gdy mamy do czynienia z żywymi organizmami, wszystko jest możliwe". Jeśli przyjmiecie takie stanowisko, nigdy nie zrozumiecie żywych organizmów. Trudno uwierzyć, że ruchy macek ośmiornicy są czymś innym niż tylko konsekwencją ruchu atomów, które zachowują się zgodnie ze znanymi prawami fizycznymi. Gdy badamy ruchy macek przyjmując takie właśnie założenie, możemy je dość dokładnie wyjaśnić. Jak dotychczas - nie ma żadnych powodów, by sądzić, że to założenie jest błędne. Odgadywanie nie jest zajęciem nienaukowym, choć tak sądzi wielu ludzi nie zajmujących się nauką. Parę lat temu rozmawiałem z pewnym laikiem o latających spodkach; ponieważ jestem naukowcem, wiem o nich wszystko! "Nie sądzę, by latające spodki rzeczywiście istniały", powiedziałem. "Czy istnienie latających spodków jest niemożliwe? - zapytał mój przeciwnik. - Czy może pan udowodnić, że nie mogą istnieć?" "Nie - przyznałem - nie mogę tego udowodnić, ale to bardzo

#### 174 Charakter praw fizycznych

mato prawdopodobne". "Zachowuje się pan w sposób bardzo nienaukowy - zarzucił mi tamten. - Skoro nie może pan dowiedzieć, że to niemożliwe, to skąd pan wie, że to nieprawdopodobne?" No tak, ale na tym jednak polega postawa naukowa. Zgodnie z nauką można tylko powiedzieć, co jest bardziej prawdopodobne, a co mniej, nie zaś wykazać, co jest możliwe,

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)

a co nie. Mogłbym wyjaśnić mu swoje stanowisko, mówiąc coś takiego: "Proszę posłuchać. Chcę powiedzieć, że na podstawie mojej wiedzy o świecie, który widzę wokół mnie, uważam, iż wszystkie sprawozdania o latających spodkach są raczej wynikiem znanych, irracjonalnych cech ziemskich istot obdarzonych inteligencją niż wynikiem działalności nieznannej, pozaziemskiej inteligencji". To jest po prostu bardziej prawdopodobne, to wszystko. Zawsze staramy się odgadnąć najbardziej prawdopodobne wyjaśnienie, pamiętając jednak, że jeśli okaże się błędne, będziemy musieli rozważyć inne możliwości.

W jaki sposób możemy odgadnąć, jakie koncepcje zachować, a jakie odrzucić? Znamy wiele ładnych zasad i istotnych faktów, ale jednak mamy kłopoty - albo pojawiają się nieskończoności, albo teoria jest niekompletna, czegoś jej brakuje. Czasami to oznacza, że musimy odrzucić jakąś uznawaną do tychczas ideę; w każdym razie w przeszłości zawsze się okazywało, że w takiej sytuacji należy odrzucić jakieś uświęcone przekonanie. Oczywiście nasuwa się pytanie, co zachować, a co odrzucić. Gdyby odrzucić wszystko, byłaby w tym przesada, a prócz tego nie mielibyśmy od czego zacząć. Zasada zachowania energii wydaje się słuszna i nie chciałbym z niej rezygnować. Trafne odgadnięcie, co odrzucić, a co zachować, wymaga sporej zręczności. W rzeczywistości potrzebny jest lut szczęścia, ale z zewnątrz wydaje się, że chodzi zawsze o pewien specjalny talent.

Pojęcie amplitudy prawdopodobieństwa jest bardzo dziwne i na pierwszy rzut oka wydaje się, że ta niezwykła, nowa idea jest zupełnie zwariowana. Jednak, choć to zaskakujące, wszystkie wnioski, które można wyprowadzić, przyjmując ideę kwantowej amplitudy prawdopodobieństwa, zostały w stu

Poszukiwania nowych praw 175

procentach potwierdzone doświadczalnie. Dlatego jestem przekonany, że gdy wreszcie poznamy tajniki budowy świata, przekonamy się, że idee mechaniki kwantowej są poprawne. Myślę, że mechanika kwantowa jest słuszna, ale to tylko domysł - mówię tu tylko o swoich przypuszczeniach. Z drugiej strony sędzę, że idea przestrzeni ciągłej jest błędna, ponieważ prowadzi do tych wszystkich nieskończoności i innych trudności oraz nie daje żadnych wskazówek, pozwalających odpowiedzieć na pytanie, co decyduje o rozmiarach cząstek. Podejrzewam, że proste idee geometryczne, gdy ekstrapolujemy je do bardzo małej skali, okazują się błędne. Rzecz jasna, wskazuję tu tylko, który fragment naszej wiedzy może być błędny, i nie mówię, czym należy go zastąpić. Gdybym wiedział, zakończyłbym ten wykład, proponując nowe prawo.

Niektórzy naukowcy wykorzystują sprzeczności między zasadami, by uzasadnić tezę, że może istnieć tylko jeden spójny świat i jeśli znajdziemy jednolitą teorię i wykonamy ściśle obliczenia, to będziemy w stanie nie tylko wyprowadzić wszystkie zasady podstawowe, ale wykażemy również, że tylko takie zasady mogą obowiązywać, gdyż tylko taka teoria stanowi spójny opis wszechświata. Wyda mi się, że to zbyt ambitny plan. Moim zdaniem jest to tak, jakby ogon machał psem, a nie pies ogonem. Uważam, że należy założyć, iż istnieją obiekty stabilne - nie pięćdziesiąt parę cząstek elementarnych, ale takie cząstki jak elektron itd. - a wtedy znane zasady prawdopodobnie pozwolą wyjaśnić takie złożone zjawiska, jakie obserwujemy. Nie przypuszczam, aby można było skonstruować ogólną teorię wszystkich zjawisk, opierając się tylko na warunku spójności.

Kolejnym problemem jest zrozumienie sensu przybliżonych symetrii. Te symetrie, takie jak stwierdzenie, że proton i neutron są niemal identyczne i różni je tylko ładunek elektryczny, czy też fakt, że symetria zwierciadlana obowiązuje we

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
wszystkich oddziaływaniach z wyjątkiem słabych oddziaływań jądrowych, są bardzo irytujące. Natura jest niemal symetryczna, ale niezupełnie. W tej sprawie istnieją dwie szkoły myśle-

#### 176 Charakter praw fizycznych

nią. Zgodnie z pierwszą sprawą jest prosta, natura jest symetryczna, ale pewna drobna komplikacja sprawia, że wydaje się nieco zezowata. Zgodnie z drugą, której jedynym przedstawicielem jestem ja sam, natura ma bardzo skomplikowany charakter i prostota wylania się dopiero po przejściu przez fazę komplikacji. Grecy wierzyli, że planety poruszają się po okręgach. W rzeczywistości orbity są eliptyczne. Nie są w pełni symetryczne, ale bardzo zbliżone do okręgów. Nasuwa się pytanie, dlaczego eliptyczne orbity planet są tak bardzo zbliżone do okręgów. Dlaczego są niemal symetryczne? Jest tak z powodu pewnego bardzo złożonego mechanizmu, określanego jako tarcie przypływowe. Możliwe, że "w głębi serca" natura nie przejmuje się symetriami, ale złożoność rzeczywistości sprawia, że wydaje się ona niemal symetryczna, tak jak planetarne elipsy wydają się niemal idealnymi kołami. Tej hipotezy nie można wykluczyć, ale nikt nie wie, jak to jest naprawdę; to wszystko tylko domysły.

Przypuśćmy, że mamy dwie teorie, A i B, które z psychologicznego punktu widzenia wydają się zupełnie różne, opierają się na całkowicie odmiennych ideach, ale ich przewidywania są dokładnie takie same i równie dobrze potwierdzone doświadczalnie. Te dwie teorie, choć początkowo wydawały się tak różne, prowadzą do jednakowych wniosków, co zazwyczaj łatwo wykazać matematycznie dowodząc, że logiczne przejście od A do B prowadzi zawsze do takich samych konsekwencji. Przyjmijmy, że mamy dwie takie teorie. Jak możemy rozstrzygnąć, która jest poprawna? Nie ma żadnego naukowego sposobu, żeby wybrać jedną z nich, ponieważ obie są równie dobrze potwierdzone eksperymentalnie. Może się zatem zdarzyć, że dwie teorie oparte na zupełnie innych ideach są matematycznie równoważne i nie ma żadnego naukowego kryterium, które pozwoliłoby jedną z nich wyróżnić. Natomiast z psychologicznego punktu widzenia, jako narzędzia służące do odgadywania nowych praw, te dwie teorie mogą być zupełnie nierównoważne. Gdy sformułujemy teorię w pewien sposób, nasuwa to na myśl różne możliwe zmiany. Na przykład, jakiś element teorii A coś jawnie sugeruje i fizyk

#### Poszukiwania nowych praw 177

mówi: "W tym punkcie trzeba zmienić teorię". Natomiast stwierdzenie, jak powinna wyglądać analogiczna zmiana w teorii B, może być bardzo trudne. Zdarza się, że wymaga to bardzo skomplikowanego rozumowania. Innymi słowy, choć przed wprowadzeniem zmian teorie są identyczne, w jednej teorii pewne zmiany wydają się w pełni naturalne, a w drugiej zupełnie sztuczne. Wobec tego musimy jednocześnie pamiętać o wszystkich teoriach - każdy dobry fizyk teoretyk zna sześć lub siedem różnych teoretycznych opisów tych samych zjawisk fizycznych. Wie, że wszystkie są równoważne, i pozostając na tym poziomie, nikt nigdy nie rozstrzygnie, która z teorii jest lepsza, ale pamięta o wszystkich, ponieważ ma nadzieję, że mogą z nich wynikać różne sugestie.

To przypomina mi o kolejnej sprawie. Filozofia, czy też ogólne idee towarzyszące teorii, może ulec ogromnej zmianie, nawet jeśli sama teoria zmienia się w niewielkim stopniu. Na przykład, newtonowska teoria czasu i przestrzeni doskonale zgadzała się z obserwacjami, ale wyjaśnienie małej, bardzo małej anomalii orbity Merkurego wymagało ogromnej rewolucji światopoglądowej. Było tak dlatego, że teoria Newtona wydawała się prosta, doskonała i prowadziła do całkowicie jednoznacznych przewidywań. Teoria, która miała prowa-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych (z txt)  
dzieć do nieco innych przewidywań, musiała być zupełnie inna. Formułując nowe prawo, nie można dokładać brzydkich poprawek do pięknej teorii: trzeba zastąpić jedną teorię inną, równie piękną. Dlatego filozoficzne różnice między teorią Newtona i teorią Einsteina są ogromne. Czym jest filozofia fizycznej teorii? W istocie są to pewne sztuczki, które pozwalają szybko obliczyć przewidywania wynikające z danej teorii. Filozofia, którą czasem nazywa się po prostu rozumieniem prawa fizycznego, to sposób, w jaki myślimy o danym prawie, aby szybko odgadnąć jego konsekwencje. Niektórzy uczeni powiadają: "Nie zważaj na filozofię ani inne podobne sprawy, po prostu odgadnij postać równań. Zadanie polega na wyliczeniu odpowiedzi, które okażą się zgodne z doświadczeniem, a do tego nie jest potrzebna żadna filozofia, argumenty lub też werbalne wyjaśnienia równań". Tego

#### 178 Charakter praw fizycznych

rodzaju postawa bywa słuszną w takich przypadkach, jak równania Maxwella. Jej zaletą jest to, że starasz się tylko odgadnąć równanie i odrzucasz wszystkie uprzedzenia, co ułatwia zgadywanie. Z drugiej strony, filozofia może pomóc w odgadnięciu prawdy. To bardzo trudno rozstrzygnąć.

Na użytek tych, którzy uważają, że liczy się tylko zgodność teorii z doświadczeniem, chciałbym przytoczyć przykład hipotetycznej rozmowy między astronomem z państwa Majów i jego uczniem. Majowie potrafili z dużą dokładnością przewidzieć zaćmienia, obliczyć pozycję Księżyca, Wenus, i tak dalej. To wszystko polegało na czystej arytmetyce. Majowie dodawali i odejmowali pewne liczby. Nie zastanawiali się, czym jest właściwie Księżyc. Nie dyskutowali nawet na temat idei, że Księżyc krąży wokół Ziemi. Po prostu liczyli, kiedy nastąpi zaćmienie lub pełnia Księżyca. Przypuśćmy, że teraz uczeń przedstawia astronomowi nową koncepcję. "A może tam w górze krążą wielkie kamienne kule, poruszające się pod działaniem takiej samej siły, która tu na Ziemi ściąga kamienie w dół? Może taka koncepcja pozwoliłaby znaleźć inny sposób obliczania ruchu ciał niebieskich?" "Tak - powiada astronom. - A jak dokładnie możesz obliczyć zaćmienia?" Młody człowiek odpowiada: "Nie rozwinąłem mojej teorii jeszcze tak daleko". Wtedy starszy astronom stwierdza: "No cóż, my potrafimy obliczać zaćmienia dokładniej niż ty, a więc nie zaprzataj sobie głowy swoim modelem, ponieważ nasz matematyczny schemat jest niewątpliwie lepszy". Ten problem pojawia się bardzo często. Gdy ktoś ma nowy pomysł i mówi: "Spójrzmy może na świat w taki sposób", inni odpowiadają na ogół: "A jak wygląda w twojej teorii rozwiązanie takiego oto problemu?". Autor nowej koncepcji odpowiada: "Nie rozwinąłem jeszcze mojej teorii tak daleko". Wtedy krytycy stwierdzają: "Za to my rozwinęliśmy naszą teorię wystarczająco daleko i potrafimy uzyskać bardzo dokładne odpowiedzi". Oto jak wygląda problem, czy należy przejmować się filozoficznymi ideami towarzyszącymi teorii. Inny sposób polega oczywiście na odgadywaniu nowych zasad. Formułując teorię względności, Einstein odgadł między

#### Poszukiwania nowych praw 179

innymi zasadę związaną z faktem, że siła ciężenia jest zawsze proporcjonalna do masy. Einstein zauważył, że jeśli ktoś siedzi w samochodzie, to nie może stwierdzić, czy samochód jedzie z przyspieszeniem, czy też znajduje się w jednorodnym polu grawitacyjnym. Dodając tę zasadę do wszystkich pozostałych, Einstein zdołał odgadnąć poprawne prawa grawitacji.

Naszkirowałem tu wiele możliwych sposobów odgadnięcia praw fizycznych. Teraz chciałbym omówić jeszcze kilka spraw dotyczących ostatecznego wyniku. Przede wszystkim, gdy już skończyliśmy, gdy mamy już matematyczną teorię po-

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
zwalającą przewidywać zjawiska, co robimy dalej? To naprawdę zdumiewająca historia. Aby przekonać się, co robi atom w określonej sytuacji, zapisujemy na papierze za pomocą specjalnych znaczków pewne reguły, po czym wprowadzamy je do maszyny, mającej postać bardzo skomplikowanego układu przełączników, i maszyna mówi nam, co robi atom! Gdyby sposób włączania i wyłączania tych przełączników stanowił model atomu, powiedziałbym, że mniej więcej rozumiem, co się dzieje. Jest dla mnie rzeczą zdumiewającą, że za pomocą matematyki można przewidzieć, co się stanie w rzeczywistości, choć prowadząc obliczenia, postępujemy zgodnie z regułami, które w istocie nie mają nic wspólnego ze zjawiskiem fizycznym. Działanie przełączników w komputerze jest czymś zupełnie odmiennym od tego, co dzieje się w naturze. Jedną z najważniejszych rzeczy w tej procedurze "hipoteza - przewidywanie - doświadczenie" jest spostrzeżenie, kiedy się ma rację. Można się czasem przekonać, że hipoteza jest słuszna, zanim jeszcze sprawdzi się wszystkie jej konsekwencje. Prawdę można rozpoznać po jej piękności i prostocie. Po sformułowaniu hipotezy wystarczy zwykle wykonać pewne niewielkie obliczenia, żeby sprawdzić, czy nie jest ona błędna z jakiegoś oczywistego powodu, a jeśli nie, to już wiadomo, że jest prawdziwa. Gdy hipoteza jest słuszna, widać to od razu, w każdym razie jeśli ktoś ma wprawę, ponieważ taka hipoteza zazwyczaj pozwala wyjaśnić o wiele więcej, niż się zakładało przy jej formułowaniu. Hipoteza mówi, że pewne zjawisko jest w istocie bardzo proste. Jeśli nie jest od razu oczywiste, że jest

#### 180 Charakter praw fizycznych

błędna, to zapewne jest słuszna. Ludzie niedoświadczeni, wspaniali i inni do nich podobni z reguły mają bardzo proste pomysły, ale natychmiast widać, że są one biedne, a zatem nie ma o czym mówić. Niedoświadczeni studenci często mają bardzo skomplikowane pomysły, które wydają się poprawne, ale ja od razu wiem, że są błędne, ponieważ prawda zawsze jest prostsza, niż to sobie wyobrażamy. Potrzebujemy wyobraźni, ale wyobraźnia jest również straszliwym kaftanem bezpieczeństwa. Szukamy nowego sposobu widzenia świata, który zgadzałby się ze wszystkim, co wiemy, ale też prowadził do nieco innych przewidywań, bo w przeciwnym razie nie byłby interesujący. Różnice muszą być takie, aby nowa teoria lepiej zgadzała się z naturą niż poprzednia. Jeśli zdołasz wymyślić nową teorię, która zgadza się ze wszystkimi już zaobserwowanymi faktami, ale prowadzi do nowych przewidywań w dziedzinie jeszcze niezbadanej, to dokonasz wielkiego odkrycia. To prawie niemożliwe, ale nie całkiem. Można znaleźć teorię, która zgadza się z wynikami wszystkich przeprowadzonych już eksperymentów w dziedzinie, w której sprawdzaliśmy nasze teorie dotychczasowe, a jednak prowadzi do zupełnie nowych przewidywań w innej dziedzinie. Czasami przewidywania takiej nowej teorii nie zgadzają się jednak z faktami. Bardzo trudno jest wymyślić coś nowego! To wymaga fantastycznej wyobraźni.

Jak wyglądać będzie przyszłość tej przygody? Jak to się skończy? Idziemy do przodu, odgadując kolejne prawa. Ile jeszcze praw musimy odkryć? Nie wiem. Niektórzy moi koledzy uważają, że proces poznawania fundamentalnych praw nigdy się nie skończy, ale ja uważam, że strumień nowych praw kiedyś się wyczerpie, z pewnością wcześniej niż, powiedzmy, za tysiąc lat. Niemożliwe, abyśmy wciąż odkrywali coraz to nowe prawa. Gdyby tak było, niekończąca się hierarchia poziomów zaczęłaby być nudna. Moim zdaniem przyszłość nauki może wyglądać dwojako. Albo poznamy wszystkie prawa, to znaczy będziemy znali dostatecznie dużo praw, aby przewidzieć wszystkie zjawiska, i wyniki zawsze będą się zgadzały z doświadczeniem, co będzie oznaczać kres nauki,



Poszukiwania nowych praw 181

albo też kolejne eksperymenty będą coraz trudniejsze i coraz bardziej kosztowne, wskutek czego będziemy w stanie przewidywać 99,9% zjawisk, ale zawsze się znajdzie jakieś niedawno odkryte zjawisko, bardzo trudne do zaobserwowania, ale za to sprzeczne z naszą teorią. Gdy tylko znajdziemy odpowiednie wyjaśnienie, pojawi się następne takie zjawisko, ale cały ten proces będzie przebiegał coraz wolniej i będzie coraz mniej interesujący. Kres nauki może również tak wyglądać! Myślę, że w ten czy inny sposób nauka dotrze do kresu.

Mamy szczęście, że żyjemy w epoce wielkich odkryć. To tak jak z odkryciem Ameryki - można to zrobić tylko raz. Obecnie odkrywamy podstawowe prawa natury i ten okres nigdy się już nie powtórzy. To cudowne, podniecające czasy, ale kiedyś się skończą. Rzecz jasna, w przyszłości będziemy mogli poświęcić się czemuś innemu, na przykład znajdowaniu związków między zjawiskami na różnych poziomach, chociażby w biologii albo badaniu planet, ale to już będą inne rzeczy niż te, którymi się teraz zajmujemy.

W przyszłości, jeśli okaże się, że wszystko już wiemy lub że nauka stała się nudna, stopniowo zaniknie żywiołowa filozofia i nawyk zwracania uwagi na wszystkie szczegóły, o których tu mówiłem. Filozofowie, którzy zawsze stoją gdzieś z boku i wygłaszają głupie uwagi, wejdą na scenę, gdyż nie będziemy potrafili odeprzeć ich ataku mówiąc, że gdyby mieli rację, moglibyśmy po prostu odgadnąć wszystkie prawa natury. Gdy już będziemy znali wszystkie prawa, filozofowie zaczną je objaśniać. Na przykład nie brakuje wyjaśnień, dlaczego świat jest trójwymiarowy. No ale skoro istnieje tylko jeden świat, trudno powiedzieć, czy te wyjaśnienia są prawdziwe. Tak samo gdy już będziemy znali wszystkie prawa, pojawi się jakieś wyjaśnienie, dlaczego obowiązują właśnie te prawa. Takich wyjaśnień nie będziemy mogli krytykować za to, że nie pozwalają posunąć się do przodu. W świecie idei zacznie się degeneracja podobna do tej, o jakiej mówią wielcy podróżnicy, gdy na nowo odkrytych terenach pojawiają się turyści.

W naszych czasach ludzie mogą przeżywać radość, ogromną radość płynącą z tego, że udaje im się przewidzieć,

182 Charakter praw fizycznych

jak zachowa się natura w sytuacji, jakiej jeszcze nigdy nie obserwowaliśmy. Na podstawie doświadczeń i danych zebranych w pewnej dziedzinie można przewidzieć, jak będą przebiegały zjawiska w dziedzinie zupełnie innej, dotychczas niezbadanej.

W przeciwieństwie do eksploracji nowych obszarów, w krainie już zbadanej znajdujemy dość wskazówek, żeby przewidzieć, jak będzie wyglądała kraina, do której właśnie wkraczamy. Zjawiska zachodzące w nowym obszarze są jednak często zupełnie inne od tych, które znamy, a zatem sformułowanie odpowiedniej hipotezy wymaga poważnego wysiłku.

Jaka cecha natury sprawia, że na podstawie już poznanych zjawisk możemy przewidzieć, jak będą wyglądały nieznanne?

Nie jest to pytanie naukowe, a zatem i ja odpowiem nienaukowe, bo inaczej nie potrafię. Myślę, że to dlatego, że natura jest bardzo prosta, a zatem bardzo piękna.

Indeks

Adams, John Couch 24  
aksjomaty 50-52, 54, 59, 60  
- Euklidesa 50  
anihilacja 68, 113, 114  
antymateria 113-114, 158  
antyneutrino 72, 81, 109, 158, 171  
antywodór 113  
atom 118, 157-158

barion 72, 73  
Bohr, Niels 81  
Brahe, Tycho 15, 16  
Cavendish, Henry 32  
ciepło 131  
czasoprzestrzeń 100-101  
cząstka lambda ( $\lambda$ ) 72-73  
cząstki elementarne 158  
Dicke, Robert Henry 34  
Dirac, Paul Adrien Maurice 62, 171  
doświadczenie Cavendisha 32-33, 34, 38  
druga zasada termodynamiki 128  
dysypacja energii 118  
działanie 110-112  
dziwność 73-74  
dźwignia 77-78  
Einstein, Albert 15, 37, 38, 58, 69, 76, 82, 98, 178, 179  
elektron 35, 67, 68, 72, 109, 113, 114, 146-149, 136, 158, 161, 171  
-, spin elektronu 109-110  
-, korpuskularno-falowa  
natura elektronów 136-147  
energia 76-77, 80, 82, 126-127  
- chemiczna 76, 77  
- cieplna 76-77, 78  
- elektryczna 76, 77  
- fali 142  
- jądrowa 76, 77  
- kinetyczna 76, 77, 79, 82  
- potencjalna 76, 78  
- sprężystości 76, 77  
- świetlna 76, 77  
- użyteczna 126-127, 128  
-, zasada zachowania energii 65, 74-83, 126-127, 157  
entropia 128  
Eotvós, baron Ronald von 34  
Euklides 50, 51, 63  
Faraday, Michael 66, 170  
fluktuacje 122-123  
foton 7-8, 136, 158  
Foucault, Jean Bernard Leon 103  
Galileusz 18, 21, 34, 103  
-, Rozmowy i dowodzenia matematyczne z zakresu dwóch nowych umiejętności 103  
geometria Euklidesa 50, 63  
- Kartezjusza 50  
grawitacja, patrz prawo powszechnego ciężenia  
grawiton 158

184 Charakter praw fizycznych  
gromada galaktyk 31  
gwiazdy, proces powstawania 32  
Heisenberg, Werner Carl 151, 171, 172  
hipertadunek, patrz dziwność  
Hoyle, Fred 130  
indukcja elektromagnetyczna 85  
interferencja 141, 143, 146  
- destruktywna 143

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)

- elektronów 138-143, 144-147
- konstruktywna 143
- jądro atomowe 158
- -, model powłokowy 162
- -, poziomy energii 130-131, 162
- Jeans James 63
- Jensen, Hans Daniel 162
- kaon 152
- Kartezjusz 50
- Kepler, Johannes 16,17,18
- Kopernik, Mikołaj 15
- kwant 7, 8
- kwantowa teoria grawitacji 37
- kwarki 71
- kwazary 80-81
- Le Verrier, Urbain 24
- Lee, Tsung Dao 109
- liczba barionowa 72-73
- -, zasada zachowania liczby barionowej 72-73
- liczba leptonowa, patrz zasada zachowania liczby leptonowej
- ładunek elektryczny 66-67,69, 71,72
- -, zasada zachowania ładunku elektrycznego 66-67
- masa 18,19, 74, 82-83
- bezwładna 34
- grawitacyjna 34
- relatywistyczna 82-83
- Słońca, patrz doświadczenie Cavendisha 33
- Ziemi, patrz doświadczenie Cavendisha 33
- , zasada zachowania masy 74
- , zasada zachowania środka masy, patrz zasada zachowania pędu
- matematyka 44, 49, 50-51, 62
- , związki z fizyką 39-63
- materia 157
- Maxwell, James Clerk 62, 98,170
- Mayer, Maria 162
- mechanika kwantowa 37, 54, 59, 86,102, 113,136,138,151, 157, 163, 170-171
- Mendelejew, Dymitr Iwanowicz 162
- mezon K-plus (K+) 72, 73
- mi (f<sub>ji</sub>), patrz moa
- Minkowski, Hermann 101
- mion (p.) 101, 160, 161, 165
- moment pędu 83-86
- -, całkowity moment pędu 52,83-84
- -, kinetyczny moment pędu 85
- -, pola elektromagnetycznego 85
- -, zasada zachowania 52-53, 54,83-85,88,89
- Morrison, Philip 108
- nadciekłość 102
- nadprzewodnictwo 159, 166
- Nagroda Nobla 10, 12, 62

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)

napięcie powierzchniowe 132  
natężenie fali 142-144, 147  
neutrino elektronowe 161  
-mionowe 160, 161,165  
neutron 67, 72,158, 161

- , rozpad neutronu 72, 81,  
109,158, 171  
Newton 18, 19, 20, 21, 22, 23, 32,  
43, 48, 49, 53, 82, 97, 98,  
165, 169, 172, 177  
- , druga zasada dynamiki 49,  
117,  
- , Pńcípia 23, 48  
oddziaływania silne 74, 160,  
161-162  
-słabe 11, 109, 114,158,171  
odwracalność zjawisk 116-129  
parzystość 113  
- , zasada zachowania  
parzystości 113  
Pasteur, Louis 107  
pęd 83,112  
- , zasada zachowania pędu  
83,88,112  
pion ( $\pi$ ) 72  
Pianek, Max 7  
ptywy 21-22  
Poincare, Jules Henri 98,101  
polaryzacja światła 105  
potencjał 55-56, 59  
pozyton 68, 113, 114  
prawa Keplera 16-18, 19-20, 21,  
48  
prawdopodobieństwo 141, 145,  
153, 154,155  
-całkowite 163  
- , amplituda prawdopodo-  
bieństwa 145, 147, 153, 174  
prawo Coulomba 35-36  
- Faradaya 40-41  
- powszechnego ciążenia 11,  
14-38,41,43-44,51-52,53,  
54-58,93,97,116-117,158,  
165,170,172, 177  
proton 36, 67, 72, 73, 81,109,  
113,158,161, 171  
przestrzeń ciągła 168, 169,175  
przyśpieszenie 18  
Indeks 185  
rachunek różniczkowy 48-49  
Rómer, Olaus 23  
rozpad beta ( $\beta$ ) 110,114,158  
- neutronu 72, 81, 109, 158,  
171  
równania Maxwella 98, 170, 178  
równowaga układu 126  
ruchy Browna 125-126  
Salpeter, Edwin 130  
Schrodinger, Erwin 62, 171  
siła 18-19  
- bezwładności 34, 104  
-dośrodkowa 19  
- elektryczna 36, 35  
- grawitacyjna 14-15, 20-21,  
30, 36, 34,41,44,54  
skretność 106-108, 110, 114

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)

Snów, C. P. 63  
stała grawitacji 14-15, 33, 36, 37,  
93  
stan uporządkowany 120-123  
strona lewa i prawa 104-110,114  
symetria 91, 110, 167, 170  
- praw fizycznych 91-114  
- przybliżona 175  
-, nierozróżnialność atomów  
lub cząstek 101-102, 161-162  
-, obrót w przestrzeni 94-95  
-,---i czasie 100, 103, 113  
-, odbicie (inwersja) 104,  
106,108,109-110,113,114  
-, przesunięcie w czasie 93,  
113  
-, - w przestrzeni (translacja)  
92-93, 110,111-112  
-, zasada względności  
95-100, 101  
-, zasady zachowania 110-113  
-, zmiana skali 102-103, 109  
światło 68, 77, 136-137, 158  
-, korpuskularno-falowa  
natura światła 136-137  
,- -, prędkość światła 23, 98-99

186 Charakter praw fizycznych  
tarcie 79, 118

- przyptykowe 118  
teoria względności 38, 71,135,  
137, 163, 170, 177, 178-179  
- zmiennych ukrytych 154  
twierdzenie Pitagorasa 50  
układ zamknięty 127-128  
wahadło Foucault 103-104  
Weyl,Hermann91  
Wheeler, John Archibald 11  
współczynnik załamania 132  
współrzędne punktu 95  
wszechświat 31, 36, 93,122-123  
Yang, Chen Ning 109  
Yukawa, Hideki 167  
zasada bezwładności 18-19,46  
- Macha 104  
- nieoznaczoności Heisen-  
berga 151-152  
- wariacyjna 56-57, 58, 59,  
60, 110,111,112  
-względności 69-71,87,  
96-97, 99-100, 101,104  
- zachowania 52, 53, 54,  
65-66, 89  
- - dziwności 73-74  
- - energii 65, 74-83,  
126-127,157  
- - liczby barionowej  
72-73  
- - liczby leptonowej 73  
- - ładunku elektrycznego  
66-67  
- - masy 74  
- - momentu pędu 52-53,  
54, 83-85,88, 89  
--parzystości 113  
--pędu 83, 88, 112  
- - symetrii 86-87

Feynman Richard P. - Charakter praw fizycznych(z txt)  
- - Środka musy, patrz  
zasada zachowania pędu  
zjawisko fotoelektryczne 136