

STEPHEN HAWKING

Leonard Mlodinow



JESZCZE KRÓTSZA HISTORIA CZASU

Przystępniejsza wersja światowego bestsellera
Bardziej zwięzła • Ilustrowana
Uzupełniona o najnowsze wyniki badań

Spis treści

Podziękowania • 6

Przedmowa • 7

1. Myślenie o wszechświecie • 9
2. Nasz ewoluujący obraz wszechświata • 11
3. Natura teorii naukowej • 17
4. Wszechświat Newtona • 22
5. Zasada względności • 28
6. Zakrzywiona przestrzeń • 39
7. Rozszerzający się wszechświat • 50
8. Wielki wybuch, czarne dziury i ewolucja wszechświata • 66
9. Grawitacja kwantowa • 81
10. Tunele czasoprzestrzenne i podróże w czasie • 97
11. Siły przyrody i unifikacja fizyki • 108
12. Zakończenie • 126

Albert Einstein • 130

Galileusz • 132

Isaac Newton • 134

Słownik • 136

O autorach • 140

Indeks • 141

Przedmowa

TYLKO DWIEMA LITERAMI ANGIELSKI TYTUŁ TEJ KSIĄŻKI różni się od tytułu książki opublikowanej w 1988 roku*. *Krótką historią czasu* przez 237 tygodni nie schodziła z listy bestsellerów londyńskiego „Sunday Timesa”. Na każdy sprzedany egzemplarz przypada średnio 750 osób spośród sześciu i pół miliarda mężczyzn, kobiet i dzieci zamieszkujących Ziemię. Był to zadziwiający sukces wydawniczy jak na książkę, która porusza niektóre z najtrudniejszych zagadnień współczesnej fizyki. Lecz owe trudne zagadnienia są zarazem najbardziej intrygujące, ponieważ bezpośrednio dotyczą zasadniczych, fundamentalnych kwestii: Co naprawdę wiemy o wszechświecie? Skąd wiemy to, co wiemy? Jak wszechświat powstał? Jaki będzie jego los? Zarówno *Krótką historią czasu*, jak i niniejsza książka w znacznej mierze koncentrują się na powyższych pytaniach.

W ciągu kilkunastu lat, które upłynęły od opublikowania *Krótkiej historii czasu*, otrzymaliśmy wiele listów z całego świata. Najczęściej powtarzającym się tematem tych listów — niezależnie od wieku, profesji i pochodzenia czytelników — była prośba o nową wersję książki niezmienną co do treści, lecz wyjaśniającą najważniejsze koncepcje w prostszy, bardziej przystępny sposób. Można by oczekiwać, że taka książka będzie zatytułowana *Nieco dłuższą historią czasu*, lecz było oczywiste, że niewielu czytelników oczekuje długiej dysertacji na poziomie akademickiego kursu kosmologii. W ten sposób ukształtowało się podejście, w wyniku którego powstała *Jeszcze krótsza historia czasu*. Utrzymaliśmy, a nawet rozszerzyliśmy w niej zasadniczą zawartość jej poprzedniczki, lecz staraliśmy się także nie powiększyć objętości i zarazem uczynić ją jak najbardziej przystępną. Historia faktycznie jest „krótsza”, ponieważ pominęliśmy niektóre bardziej techniczne fragmenty, co jednak skompensowaliśmy wnikliwszym

* Wydanie polskie w przekładzie Piotra Amsterdamskiego ukazało się w roku 1996 i 2000 nakładem Zysk i S-ka Wydawnictwo w Poznaniu. (Wszystkie przypisy pochodzą od tłumacza).

potraktowaniem materiału, który stanowi w istocie najważniejszą i zasadniczą treść książki.

Skorzystalismy także z okazji i uwzględniliśmy pewne nowe rezultaty teoretyczne oraz wyniki obserwacji. *Jeszcze krótsza historia czasu* opisuje najnowsze osiągnięcia w poszukiwaniu kompletnej, jednolitej (zunifikowanej) teorii wszystkich sił natury. W szczególności dotyczy to postępów w teorii strun, a także pewnych dualizmów, czyli podobieństw pozornie różnych teorii fizycznych, które wydają się wskazywać, że zunifikowana teoria naprawdę istnieje. Książka zawiera także pewne ważne nowe wyniki obserwacyjne poczynione między innymi przez satelitę COBE (COsmic Background Explorer — Kosmiczny Badacz Tła) oraz Kosmiczny Teleskop Hubble'a.

Czterdzieści lat temu Richard Feynman powiedział: „Mamy szczęście, ponieważ żyjemy w epoce, w której wciąż dokonuje się odkryć. To tak jak z odkryciami geograficznymi — Amerykę można odkryć tylko raz. Żyjemy w epoce, w której dokonuje się odkryć dotyczących fundamentalnych praw natury”. Dzisiaj jesteśmy bliżsi zrozumienia natury wszechświata niż w jakiegokolwiek wcześniejszej epoce. Naszym celem przy pisaniu tej książki było podzielenie się z czytelnikami tym podnieceniem, jakie towarzyszy odkrywaniu owych praw, a także ukazanie obrazu rzeczywistości, jaki się z nich wyłania.

MYŚLENIE O WSZECHŚWIECIE

ŻYJEMY W PRZEDZIWNYM I ZARAZEM CUDOWNYM ŚWIECIE. Potrzeba niezwyklej wyobraźni, aby pojąć jego wiek i rozmiary oraz docenić jego grozę i piękno. Wydaje się, że w tym ogromnym kosmosie człowiek zajmuje dość niepozorne miejsce, lecz mimo to próbuje znaleźć w nim sens i zrozumieć swoją rolę. Jakiś czas temu pewien znany uczony (podobno był to Bertrand Russell) w trakcie publicznego wykładu opisywał, w jaki sposób Ziemia krąży wokół Słońca, a z kolei Słońce krąży wokół centrum ogromnego układu gwiazd, który nazywamy Galaktyką. Pod koniec wykładu pewna starsza pani wstała i rzekła: „Opowiada pan głupstwa. W rzeczywistości świat jest płaski i opiera się na grzbiecie gigantycznego żółwia”. Uczony z uśmiechem odpowiedział: „A na czym spoczywa żółw?”. Starsza pani odparła: „Jesteś sprytny, młody człowieku, bardzo sprytny. Ale tam są same żółwie, aż do samego dołu!”.

Obecnie większość ludzi zapewne wyśmiałaby obraz wszechświata w postaci nieskończonej wieży z żółwi. Na jakiej podstawie uważamy, że wiemy lepiej? Zapomnijmy na chwilę o wszystkim, co wiemy — albo sądziśmy, że wiemy — na temat kosmosu, i spójrzmy na nocne niebo. Czym są te wszystkie światełka? Czy nie są raczej maleńkimi ogniskami? Dość trudno wyobrazić sobie ich prawdziwą naturę, ponieważ odbiega ona od wszystkiego, co może nam podpowiedzieć nasze codzienne doświadczenie. Jeżeli często oglądamy gwiazdy, to prawdopodobnie widzieliśmy ulotne światło unoszące się o świcie lub o zmierzchu nad horyzontem. To Merkury, planeta, lecz jakże odmienna od naszej planety — Ziemi. Jeden dzień na Merkurym trwa dwie trzecie jego planetarnego roku. Temperatura na jego powierzchni przekracza 400 stopni Celsjusza, gdy świeci Słońce, lecz spada niemal do -200 stopni Celsjusza w środku nocy. Ale różnice między Ziemią i Merkurym to fraszka w porównaniu z przeciętną gwiazdą, która stanowi potężny tygiel spalający w każdej sekundzie miliony ton materii, a temperatury w jej rdzeniu sięgają dziesiątek milionów stopni.

Kolejną rzeczą, którą trudno sobie wyobrazić, są odległości planet i gwiazd. Starożytni Chińczycy budowali kamienne wieże, aby oglądać gwiazdy z bliższej odległości. Dość naturalne wydaje się przekonanie, że gwiazdy są blisko, znacznie bliżej niż w rzeczywistości. W naszym codziennym życiu nie ma niczego, co pozwoliłoby nam doświadczyć takich odległości, z jakimi mamy do czynienia w kosmosie. Są one tak olbrzymie, że nie ma sensu mierzenie ich w stopach, milach, metrach i kilometrach, których używamy do mierzenia większości odległości na Ziemi. W przestrzeni jednostką odległości jest rok świetlny, czyli dystans, do którego przebycia światło potrzebuje jednego roku. W ciągu jednej sekundy promień światła pokonuje 300 000 kilometrów, więc rok świetlny to naprawdę duża odległość. Najbliższą gwiazdą, nie licząc naszego Słońca, jest Proxima Centauri (znana także jako Alfa Centauri C), która znajduje się w odległości około czterech lat świetlnych od nas. Nawet najszybsze statki kosmiczne, które dziś potrafimy zaprojektować, potrzebowałyby około dziesięciu tysięcy lat na pokonanie takiej odległości.

Starożytni usilnie próbowali zrozumieć wszechświat, lecz nie dysponowali narzędziami, które obecnie są do naszej dyspozycji: matematyką (i nauką w ogólności), komputerami ani teleskopami. Za pomocą tych i innych narzędzi naukowcy połączyli w jedną całość znaczną ilość wiedzy na temat przestrzeni. Ale co my właściwie wiemy o wszechświecie i skąd to wiemy? Jak powstał wszechświat? Dokąd zmierza? Czy miał początek, a jeżeli tak, to co było wcześniej? Czym jest czas? Czy kiedykolwiek się skończy? Czy można poruszać się wstecz w czasie? Najnowsze osiągnięcia fizyki, co najmniej w części uzyskane dzięki nowym technologiom, przynoszą odpowiedzi na niektóre z tych odwiecznych pytań. Któregoś dnia odpowiedzi te staną się równie oczywiste jak krążenie Ziemi wokół Słońca — lub równie niedorzeczne jak wieża zółwi. Czas (czymkolwiek jest) pokaże.

NASZ EWOLUJĄCY OBRAZ WSZECHŚWIATA

WPRAWDZIE JESZCZE W CZASACH KOLUMBA SPORO LUDZI SĄDZIŁO, że Ziemia jest płaska (nawet dzisiaj znalazłoby się kilka takich osób), lecz korzenie nowoczesnej astronomii sięgają starożytnych Greków. Około 340 roku p.n.e. grecki filozof Arystoteles napisał traktat zatytułowany *O niebie*, w którym wysunął wiele istotnych argumentów na rzecz tezy, iż Ziemia nie jest płaska, lecz jest kulą.

Jeden z argumentów był oparty na zaćmieniach Księżyca. Arystoteles uświadomił sobie, że zaćmienia są spowodowane przez Ziemię. Gdy Ziemia znajdzie się między Księżycem i Słońcem, Księżyc trafia w cień Ziemi, w wyniku czego następuje zaćmienie. Arystoteles zauważył, że widoczny na Księżycu cień Ziemi jest zawsze okrągły. Takiego kształtu należałoby oczekiwać, gdyby Ziemia była kulą, lecz nie wtedy, gdyby była płaskim dyskiem. Gdyby Ziemia była płaskim dyskiem, jej cień byłby okrągły tylko wtedy, gdy Słońce znajdowałoby się dokładnie pod środkiem dysku. W innych położeniach cień byłby wydłużony — miałby kształt elipsy (elipsa jest wydłużonym okręgiem).

Grecy odkryli także inne argumenty na rzecz kulistej Ziemi. Gdyby Ziemia była płaska, statek na morzu pojawiałby się na horyzoncie jako małeńka, pozbawiona widocznych szczegółów kropka. W miarę zbliżania się statku szczegóły — takie jak żagle i kadłub — stawałyby się stopniowo coraz lepiej widoczne. W rzeczywistości odbywa się to inaczej. Gdy statek pojawia się na horyzoncie, najpierw widać żagle, a kadłub staje się widoczny znacznie później. Fakt, iż najpierw zza horyzontu wylaniają się maszty, stanowi dowód, że Ziemia jest kulą.

Grecy bardzo wiele uwagi poświęcali obserwacjom nieba. W czasach Arystotelesa istniały zapisy prowadzonych od wielu setek lat obserwacji dotyczących ruchów światła na nocnym niebie. Zwrócono uwagę na to, że niemal wszystkie spośród tysięcy widocznych światła poruszają się współ-



Statek na horyzoncie

Ziemia jest kulą, więc maszty i żagle statku wylaniającego się zza horyzontu pojawiają się wcześniej niż kadłub.

nie, jednakowym ruchem na niebie, lecz pięć z nich (nie licząc Księżyca) niekiedy wyłamuje się i zbacza z regularnej ścieżki prowadzącej ze wschodu na zachód, a czasem nawet zawraca, wykonując pętlę. Światła owe nazywano planetami, od greckiego słowa oznaczającego wędrowca. Grecy zaobserwowali pięć planet, ponieważ tylko pięć z nich widać gołym okiem z Ziemi: Merkurego, Wenus, Marsa, Jowisza i Saturna. Dzisiaj wiemy, dlaczego planety poruszają się na niebie wzdłuż takich niezwyklej trajektorii: gwiazdy prawie się nie poruszają względem naszego Układu Słonecznego, natomiast planety krążą wokół Słońca, więc ich ruch względem Ziemi jest znacznie bardziej skomplikowany niż ruchy odległych gwiazd.

Arystoteles sądził, że Ziemia jest nieruchoma, natomiast Słońce, Księżyc, planety i gwiazdy poruszają się wzdłuż kołowych orbit wokół Ziemi. Opierał się na mistycznych założeniach, że Ziemia stanowi centrum wszechświata, a ruch kołowy to najdoskonalsza forma ruchu. W następnym stule-

ciu inny Grek, Ptolemeusz, przekształcił te idee w kompletny model nieba. Ptolemeusz podchodził do swoich studiów z prawdziwą pasją i zaangażowaniem, czego dowodzi przypisywany mu epigramat: „Kiedy śledzę obiegi gwiazd, tudzież powroty ich, już nie dotykam ziemi” [przekł. T. Sinko].

W modelu Ptolemeusza Ziemię otaczało osiem koncentrycznych, wirujących sfer, dla których Ziemia stanowiła wspólny środek. Każda kolejna sfera była trochę większa od poprzedniej, na podobieństwo rosyjskich babuszek. Nigdy nie zostało wyraźnie powiedziane, co znajduje się poza ostatnią sferą, w każdym razie nie była to część obserwowalnego wszechświata. Sfera położona najbardziej na zewnątrz stanowiła zatem pewnego rodzaju granicę lub „pojemnik” na wszechświat. Gwiazdy zajmowały ustalone miejsca na tej sferze i przemieszczały się na niebie wraz z nią, zachowując niezmienną wzajemną odległość i niezmienną położeń względ-



Model Ptolemeusza

W modelu Ptolemeusza Ziemia znajdowała się w środku wszechświata i była otoczona przez osiem sfer unoszących wszystkie znane ciała niebieskie.

dem siebie, dokładnie tak, jak obserwujemy. Wewnętrzne sfery zawierały planety. Te ostatnie nie były jednak sztywno przymocowane do swoich sfer, tak jak gwiazdy, lecz poruszały się w obrębie swoich sfer wzdłuż małych okręgów zwanych epicyklami. Wirowanie sfer w połączeniu z krążeniem planet po epicyklach powodowało, że ruchy planet względem Ziemi były dość skomplikowane. W ten sposób Ptolemeusz był w stanie uwzględnić fakt, że obserwowane trajektorie planet są znacznie bardziej złożone niż prosty ruch w poprzek nieba.

• Model Ptolemeusza stanowił całkiem dokładny system pozwalający na dość precyzyjne przewidywania położenia ciał niebieskich, lecz Ptolemeusz musiał między innymi przyjąć założenie, że Księżyc poruszał się w taki sposób, iż jego odległość od Ziemi zmieniała się w dość znacznym zakresie — w najbliższym położeniu znajdował się dwukrotnie bliżej niż w najdalszym. Prowadziło to do wniosku, że powinien wtedy być dwukrotnie większy! Ptolemeusz zdawał sobie sprawę z tej wady, lecz jego model został mimo to powszechnie przyjęty (aczkolwiek nie stał się uniwersalnym modelem zaakceptowanym przez wszystkich). Został uznany przez Kościół za oficjalny, zgodny z Pismem Świętym obraz wszechświata, między innymi dlatego, że poza sferą gwiazd stałych zostawiał mnóstwo miejsca na niebo i piekło.

Inny model został zaproponowany w 1514 roku przez polskiego kanonika, Mikołaja Kopernika (początkowo, zapewne w obawie przed posądzeniem o herezję, Kopernik rozpowszechnił swój model anonimowo). Wyprowadził on rewolucyjną ideę, zgodnie z którą nie wszystkie ciała niebieskie muszą krążyć wokół Ziemi. Koncepcja Kopernika polegała na tym, że Słońce jest nieruchome i stanowi centrum Układu Słonecznego, a Ziemia i planety krążą wokół Słońca wzdłuż kołowych orbit. Podobnie jak u Ptolemeusza, model Kopernika działał poprawnie, lecz nie był idealnie zgodny z obserwacjami. Okazał się jednak znacznie prostszy od koncepcji Ptolemeusza, więc można było oczekiwać, że zostanie szybko przyjęty. Upłynęło jednak niemal sto lat, zanim idea Kopernika została potraktowana poważnie. Dwaj astronomowie — Niemiec Johannes Kepler oraz Włoch Galileo Galilei — zaczęli publicznie popierać teorię Kopernika.

W 1609 roku Galileusz zaczął obserwacje nieba za pomocą teleskopu, który został dopiero co wynaleziony. Gdy spojrział na Jowisza, przekonał się, że towarzyszy mu kilka małych satelitów — księżyców, które krążą wokół Jowisza, a nie wokół Ziemi. Oznaczało to, że nie wszystkie ciała niebieskie muszą krążyć bezpośrednio wokół Ziemi, jak uważali Arystoteles i Ptolemeusz. W tym samym czasie Kepler udoskonalił teorię Kopernika, sugerując, że planety krążą nie po kołowych, lecz po eliptycznych orbitach.

Wraz z tą zmianą przewidywania teorii zaczęły się zgadzać z obserwacjami. Odkrycia te zadały śmiertelne ciosy modelowi Ptolemeusza.

Eliptyczne orbity poprawiły model Kopernika, lecz dla Keplera stanowiły one jedynie prowizoryczną hipotezę, ponieważ kierował się on ugruntowanymi ideami na temat natury, które nie były oparte na żadnych obserwacjach: podobnie jak Arystoteles, Kepler po prostu wierzył, że elipsy są mniej doskonałe niż okręgi. Koncepcja ruchu planet wzdłuż tak niedoskonałych orbit wydawała mu się na tyle brzydka, że nie mogła stanowić ostatecznej prawdy. Keplera niepokoiło także to, że nie potrafił pogodzić eliptycznych orbit z ideą przyciągania planet przez siły magnetyczne Słońca. Koncepcja sił magnetycznych była wprawdzie błędna, lecz należy zwrócić uwagę, że Kepler pierwszy zdał sobie sprawę, iż muszą istnieć siły odpowiedzialne za ruchy planet. Poprawne wyjaśnienie, dlaczego planety krążą wokół Słońca, pojawiło się znacznie później, w 1687 roku, gdy sir Isaac Newton opublikował swoje *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, prawdopodobnie najważniejsze dzieło w historii nauk fizycznych.

Newton sformułował w *Principiach* prawo, które mówi, że każde ciało w naturalny sposób pozostaje w spoczynku tak długo, dopóki nie zadziała na nie siła. Opisał także, w jaki sposób działanie siły zmusza ciało do ruchu lub zmienia jego sposób poruszania się. Dlaczego zatem planety poruszają się wokół Słońca po elipsach? Newton stwierdził, że odpowiedzialna za to jest określona siła i że jest to ta sama siła, która powoduje, że gdy się jakieś ciało upuści, spada ono na ziemię, a nie pozostaje w spoczynku. Nazwał tę siłę grawitacją (przed Newtonem słowo „grawitacja” oznaczało albo poważny nastrój, albo poważny ciężar). Wynalazł także matematyczne narzędzia, które pozwalają liczbowo określić, w jaki sposób ciała reagują, gdy działa na nie jakaś siła, na przykład grawitacja. Rozwiązał wynikające ze swoich praw równania i pokazał, że wskutek grawitacji Słońca Ziemia i inne planety powinny poruszać się po elipsach — dokładnie tak, jak przewidział Kepler! Newton stwierdził, że jego prawa dotyczą wszystkich obiektów w całym wszechświecie, od spadających jabłek po gwiazdy i planety. Po raz pierwszy w historii trajektorie planet zostały wyjaśnione w kategoriach praw, które decydują także o ruchach ciał na Ziemi. Był to początek zarówno nowoczesnej fizyki, jak i nowoczesnej astronomii.

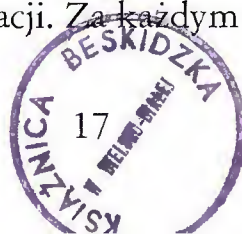
Porzuciwszy koncepcję sfer Ptolemeusza, astronomowie nie mieli już powodów do zakładania, że wszechświat posiada naturalną granicę — zewnętrzną sferę. Co więcej, ponieważ nie obserwowali żadnych ruchów gwiazd, oprócz dobowej rotacji wywołanej wirowym ruchem Ziemi wokół własnej osi, naturalne wydawało się założenie, że gwiazdy są takimi samymi obiektami jak Słońce, lecz położonymi znacznie dalej. W ten sposób po-

rzuciliśmy nie tylko ideę, że Ziemia jest środkiem wszechświata, lecz nawet nasze Słońce, być może wraz z całym Układem Słonecznym, przestało być wyjątkowym obiektem w kosmosie. Była to głęboka, fundamentalna zmiana postrzegania wszechświata, która zapoczątkowała nowoczesną naukę.

NATURA TEORII NAUKOWEJ

ROZWAŻANIE NATURY WSZECHŚWIATA oraz rozważanie takich kwestii jak jego początek i koniec wymaga jasnego, wyraźnego zdefiniowania, czym jest teoria naukowa. Przyjmijmy nieco uproszczony pogląd, zgodnie z którym teoria jest modelem wszechświata, lub jego części, wraz z zestawem reguł, które określają związki między wielkościami obserwowanymi w przyrodzie a wielkościami opisywanymi przez model. Teoria stanowi byt istniejący wyłącznie w umyśle człowieka — nie istnieje w żadnej innej rzeczywistości (cokolwiek by to miało znaczyć). Teoria jest dobra, jeżeli spełnia dwa warunki. Powinna poprawnie i dokładnie opisywać dużą klasę obserwacji na podstawie modelu zawierającego tylko kilka arbitralnych parametrów oraz umożliwiać ilościowe przewidywania dotyczące rezultatów przyszłych obserwacji. Dla przykładu, Arystoteles wierzył w teorię Empedoklesa, zgodnie z którą wszystko jest zrobione z czterech elementów: ziemi, powietrza, ognia i wody. Teoria miała dostatecznie proste podstawy, lecz nie pozwalała formułować żadnych definitywnych przewidywań. Teoria Newtona jest oparta na jeszcze prostszym modelu, w którym ciała przyciągają się z siłą proporcjonalną do wielkości zwanej masą oraz odwrotnie proporcjonalną do kwadratu odległości między nimi, lecz pozwala przewidywać ruchy Słońca, Księżyca oraz planet z bardzo dużą dokładnością.

Każda teoria fizyczna stanowi prowizoryczną konstrukcję w tym sensie, że jest tylko hipotezą — nie da się jej udowodnić. Niezależnie od liczby eksperymentów, których rezultaty są zgodne z jakąś teorią, nigdy nie mamy pewności, czy wynik następnego eksperymentu nie będzie z nią sprzeczny. Z drugiej strony, aby teorię obalić, wystarczy jedna obserwacja lub doświadczenie, którego wynik jest sprzeczny z przewidywaniami teorii. Jak stwierdził filozof Karl Popper, dobra teoria powinna dawać wiele przewidywań, które powinny w zasadzie być weryfikowalne lub falsyfikowalne dzięki wynikom obserwacji. Za każdym razem, gdy nowe ekspery-



menty dają wyniki zgodne z przewidywaniami, teoria przeżywa, a nasze zaufanie do niej wzrasta; jeżeli jednak kiedykolwiek pojawi się wynik sprzeczny z teorią, musimy ją porzucić lub zmodyfikować. W każdym razie taka powinna być kolej rzeczy, aczkolwiek zawsze można zakwestionować kompetencje osoby wykonującej obserwacje.

W praktyce nowa teoria często stanowi rozszerzenie poprzedniej. Na przykład bardzo precyzyjne obserwacje Merkurego wykazały niewielkie różnice między parametrami jego ruchu wokół Słońca a przewidywaniami teorii grawitacji Newtona. Ogólna teoria względności Einsteina przewidywała nieco odmienny ruch planet niż teoria Newtona. To, że przewidywania Einsteina zgadzały się z obserwacjami, a Newtona nie, było jednym z kluczowych dowodów na rzecz poprawności nowej teorii. Jednakże nadal stosujemy teorię Newtona w większości praktycznych sytuacji, ponieważ w warunkach, z którymi normalnie mamy do czynienia, jej przewidywania bardzo mało się różnią od przewidywań ogólnej teorii względności (teoria Newtona ma także tę przewagę, że jest znacznie prostsza niż teoria Einsteina).

Ostatecznym celem nauki jest pojedyncza teoria, która będzie opisywać cały wszechświat. Wydaje się, że większość naukowców stosuje podejście, w którym problem jest podzielony na dwa zagadnienia. Z jednej strony mamy prawa, które mówią, w jaki sposób wszechświat zmienia się w czasie (jeżeli wiemy, jak wszechświat wygląda w pewnym momencie, to prawa te mówią, jak będzie wyglądał w dowolnym późniejszym momencie). Z drugiej strony mamy do czynienia z kwestią początkowego stanu wszechświata. Niektórzy sądzą, że nauka powinna się zajmować tylko pierwszym z powyższych dwóch zagadnień, a kwestię stanu początkowego traktują tak, jakby stanowiła przedmiot metafizyki lub religii. Ich zdaniem Bóg, jako istota wszechmocna, mógł zacząć wszechświat tak, jak chciał. Być może, lecz w takim przypadku Bóg mógł także spowodować, aby wszechświat rozwijał się w całkowicie dowolny sposób. Wydaje się jednak, że Bóg wybrał bardzo regularny sposób ewolucji wszechświata, zgodny w pewnymi prawami. Równie słuszne wydaje się zatem założenie, że istnieją także prawa rządzące stanem początkowym wszechświata.

Okazuje się, że bardzo trudno jest stworzyć teorię, która opisywałaby wszechświat jako całość. Rozbiliśmy więc problem na części i wynaleźliśmy kilka cząstkowych teorii. Każda z nich opisuje i przewiduje pewną ograniczoną klasę obserwacji, pomijając inne wielkości lub przedstawiając je w postaci kilku prostych liczb. Być może takie podejście jest całkowicie błędne. Jeżeli wszystko we wszechświecie zależy w fundamentalny sposób od wszystkiego innego, to znalezienie pełnego rozwiązania przez badanie

cząstkowych, odizolowanych od całości problemów może się okazać niemożliwe. Lecz w taki sposób robiliśmy postępy w przeszłości. Klasyczny przykład stanowi ponownie teoria grawitacji Newtona, która mówi, że siła grawitacji między dwoma ciałami zależy tylko od jednej liczby związanej z każdym z nich — masy — i jest niezależna od innych parametrów obu ciał. Dlatego do obliczania orbit planet nie potrzebujemy teorii opisującej strukturę oraz budowę Słońca.

Obecnie naukowcy budują modele wszechświata za pomocą dwóch podstawowych teorii — ogólnej teorii względności oraz mechaniki kwantowej — które stanowią wielkie intelektualne osiągnięcia pierwszej połowy dwudziestego wieku. Ogólna teoria względności opisuje siłę grawitacji oraz wielkoskalową strukturę wszechświata, czyli strukturę w skali sięgającej od zaledwie kilku kilometrów aż do milionów milionów milionów kilometrów (1 z dwudziestoma czterema zerami) kilometrów, czyli rozmiarów obserwowalnego wszechświata. Z drugiej strony mamy mechanikę kwantową, która dotyczy zjawisk w ekstremalnie małych skalach, takich jak milionowa z milionowej części centymetra. Te dwie teorie nie są, niestety, wzajemnie spójne i nie mogą być obie poprawne. Jednym z głów-



Atomy i galaktyki

W pierwszej połowie dwudziestego wieku fizycy rozszerzyli zasięg swoich teorii poza codzienny świat Isaaca Newtona i objęli nimi zarówno najmniejsze, jak i największe ekstrema naszego wszechświata.

nych celów współczesnej fizyki, i zarazem jednym z głównych tematów tej książki, jest poszukiwanie nowej, ogólniejszej teorii — kwantowej teorii grawitacji — która obejmowałaby obie obowiązujące dziś teorie. Nie mamy jeszcze takiej teorii i być może jeszcze długo nie będziemy jej mieć, lecz znamy już wiele cech oraz warunków, które musi ona spełniać. Jak zobaczymy w dalszych rozdziałach, wiemy także całkiem sporo na temat przewidywań oraz wniosków, które muszą wynikać z kwantowej teorii grawitacji.

Jeżeli założymy, że wszechświat nie zachowuje się w sposób arbitralny, lecz rządzą nim określone prawa, to musimy ostatecznie dojść do wniosku, że cząstkowe teorie będą musiały połączyć się w kompletną, jednolitą teorię, która będzie opisywać wszystko we wszechświecie. W poszukiwaniach takiej teorii kryje się jednak pewien fundamentalny paradoks. Sformułowane powyżej idee dotyczące teorii naukowych zakładają, że jesteśmy racjonalnymi istotami, które mogą obserwować wszechświat oraz wyciągać logiczne wnioski na podstawie tego, co widzą. W takim razie rozsądne wydaje się również przypuszczenie, że robimy postępy i zbliżamy się ku odkryciu praw, które rządzą naszym wszechświatem. Jeżeli jednak taka teoria rzeczywiście istnieje, to powinna ona także obejmować nasze działania — czyli sama teoria powinna określać wynik naszych poszukiwań! Czy powinna zatem bezwarunkowo przesądzać, że na podstawie dostępnych obserwacji dojdziemy do właściwych wniosków? Równie dobrze może się przecież okazać, że dojdziemy do błędnych konkluzji. A może nie dojdziemy do żadnej ostatecznej konkluzji?

Jedyne rozwiązanie, jakie potrafimy zaproponować w odpowiedzi na tak postawiony problem, jest oparte na Darwinowskiej zasadzie doboru naturalnego. Jego podstawę stanowi idea, zgodnie z którą w każdej populacji samoreprodukujących się organizmów istnieją wariacje materiału genetycznego oraz różnice wychowania, które powodują, że niektóre osobniki są bardziej zdolne do wyciągania właściwych wniosków na temat otaczającego ich świata oraz do odpowiedniego działania. Szanse przeżycia tych osobników oraz ich reprodukcji będą zatem odpowiednio większe, więc ich wzorce zachowania oraz myślenia powinny dominować. Mieliliśmy wiele dowodów w przeszłości, że inteligencja oraz odkrycia naukowe stanowią istotny czynnik zwiększający szanse przetrwania. Nie jest całkiem oczywiste, czy nadal tak będzie — równie dobrze może się okazać, że nasze odkrycia naukowe spowodują naszą zagładę. Nawet jeżeli tak się nie stanie, kompletna, jednolita teoria niekoniecznie musi spowodować istotną zmianę naszych szans przetrwania. Zakładając jednak, że wszechświat ewoluuje w regularny sposób, możemy oczekiwać, że zdolności do rozu-

mowania, którymi obdarzył nas dobór naturalny, będą także przydatne w poszukiwaniach kompletnej, jednolitej teorii i nie doprowadzą nas do błędnych wniosków.

Częstkowe teorie, którymi obecnie dysponujemy, umożliwiają dokładne przewidywania niemal we wszystkich sytuacjach, oprócz tych najbardziej ekstremalnych, więc wydaje się, że trudno znaleźć praktyczne uzasadnienia dla poszukiwań ostatecznej teorii wszechświata. (Warto jednak zauważyć, że podobny argument mógłby w swoim czasie zostać użyty przeciwko teorii względności oraz mechanice kwantowej, a teorie te dały nam zarówno energię jądrową, jak i rewolucję w mikroelektronice). Odkrycie kompletnej, jednolitej teorii nie musi wcale ułatwić przetrwania naszego gatunku. Nie musi nawet wpłynąć na zmianę naszego stylu życia. Lecz od zarania cywilizacji ludzie nie zadowalali się postrzeganiem wszechświata jako zbioru niezwiązanych ze sobą i niewytłumaczalnych zjawisk. Zawsze dążyliśmy do zrozumienia porządku ukrytego pod powierzchnią zjawisk. Także i dzisiaj chcemy wiedzieć, dlaczego tu jesteśmy i skąd pochodzimy. Głód wiedzy to wystarczające uzasadnienie naszych nieustannych poszukiwań. A naszym celem jest ni mniej, ni więcej tylko kompletny opis wszechświata, w którym żyjemy.

WSZECHŚWIAT NEWTONA

NASZE OBECNE IDEE DOTYCZĄCE RUCHÓW CIAŁ wywodzą się od Galileusza i Newtona. Przed nimi obowiązywały koncepcje Arystotelesa, który stwierdził, że naturalnym stanem ciała jest stan spoczynku, natomiast ruch wymaga działania siły lub impulsu. Wynikało z nich także, iż cięższe ciało powinno spadać na ziemię szybciej niż lekkie, ponieważ działająca na nie siła przyciągania jest większa w przypadku cięższego ciała. Zgodnie z obowiązującą od czasów Arystotelesa tradycją prawa rządzące wszechświatem można odkryć wyłącznie przez rozumowanie, bez potrzeby odwoływania się do obserwacji, więc przed Galileuszem nikt nie zawracał sobie głowy sprawdzaniem, czy ciała o różnych masach faktycznie spadają z różnymi prędkościami. Według powszechnie obowiązującej tradycji Galileusz udowodnił, że pogląd Arystotelesa jest fałszywy, zrzucając kule o różnej masie z krzywej wieży w Pizie. Ta historia jest niemal na pewno fałszywa*, lecz Galileusz rzeczywiście wykonał równoważny eksperyment — badał staczanie się kul z gładkiej pochylni. Sytuacja jest podobna do pionowego spadania ciężkich kul, lecz obserwacje stają się łatwiejsze, ponieważ prędkości ciał są mniejsze. Pomiary Galileusza wskazywały, że każde ciało zwiększa swoją prędkość w takim samym stopniu, niezależnie od swej masy. Jeżeli na przykład puścimy kulę na pochylni, która obniża się o jeden metr na każde dziesięć metrów długości, kula będzie się staczać z prędkością około jednego metra na sekundę po jednej sekundzie, z prędkością dwóch metrów na sekundę po dwóch sekundach i tak dalej niezależnie od masy kuli. Kula wykonana z ołowiu będzie oczywiście spadać z wieży szyb-

* Większość historyków nauki i biografów uważa, że Galileusz eksperymentował na równi pochyłej, a nie na wieży. Istnieją jednak hipotezy, że eksperyment na wieży w Pizie faktycznie się odbył, lecz miał raczej charakter publicznego pokazu. Galileusz był prekursorem popularyzacji nauki i zarazem mistrzem autoreklamy — wiadomo, że publicznie demonstrował działanie przyrządu zwanego obecnie lunetą Galileusza — więc można przypuszczać, że nie zignorował okazji do zdemonstrowania sprzeczności u Arystotelesa.

ciej niż ptasie piórko, ale tylko z powodu oporu powietrza. Jeżeli zrzucimy dwa ciała, którym powietrze nie stawia znacznego oporu, na przykład dwie ołowiane kule o różnej masie, będą spadać z jednakową prędkością (za chwilę zobaczymy, dlaczego tak się dzieje). Na Księżycu nie ma atmosfery, której opór mógłby spowalniać spadające ciała, więc astronauta David R. Scott przeprowadził eksperyment z piórkiem sokoła i geologicznym młotkiem. Okazało się, że spadły w tym samym czasie.

Pomiary Galileusza wykorzystał Newton jako podstawę swoich praw ruchu. W eksperymentach Galileusza na ciało staczające się wzdłuż pochylnej płaszczyzny działała ta sama siła (równa jego ciężarowi), w wyniku czego ciało nieustannie przyspiesza. To dowodzi, że skutkiem działania siły jest zawsze zmiana prędkości ciała, a nie tylko wprawianie go w ruch, jak sądzono uprzednio. Oznacza to także, że gdy na ciało przestaną działać wszelkie siły, ciało będzie się nadal poruszać ruchem prostoliniowym ze stałą prędkością. Ta idea została po raz pierwszy opublikowana w 1687 roku w dziele *Principia Mathematica* Newtona. Nosi ona nazwę pierwszego prawa Newtona. Drugie prawo mówi o tym, co się dzieje z ciałem, gdy działa na nie jakaś siła. Stwierdza ono, że ciało będzie przyspieszać, czyli zmieniać swą prędkość, w tempie proporcjonalnym do wielkości siły (na przykład pod wpływem dwukrotnie większej siły przyspieszenie będzie dwukrotnie większe). Przyspieszenie będzie tym większe, im mniejsza masa (czyli ilość materii) ciała — taka sama siła działająca na ciało o dwukrotnie większej masie spowoduje o połowę mniejsze przyspieszenie. Znany przykład stanowi samochód — im mocniejszy silnik, tym większe przyspieszenie, lecz im cięższy samochód, tym mniejsze przyspieszenie zapewni mu ten sam silnik.

Oprócz praw ruchu, które opisują, w jaki sposób ciała reagują na działanie sił, teoria Newtona mówi także, w jaki sposób działa jeden określony typ sił — grawitacja. Jak już wspomnieliśmy, teoria ta stwierdza, że każde ciało przyciąga każde inne ciało z siłą, która jest proporcjonalna do mas obu ciał. Tak więc siła przyciągania dwóch ciał podwoi się, jeżeli masa jednego z nich (na przykład ciała A) zostanie podwojona. Dokładnie tego należałoby oczekiwać, ponieważ nowe ciało A można sobie wyobrazić jako złożone z dwóch ciał, każde z początkową masą ciała A. Każde z nich będzie przyciągać ciało B z taką samą siłą, jak oryginalne ciało A. Zatem siła przyciągania będzie dwukrotnie większa po podwojeniu masy ciała. A jeżeli masa jednego z ciał zostanie zwiększona sześciokrotnie albo masa jednego z nich zostanie zwiększona dwukrotnie, a drugiego trzykrotnie, to siła ich wzajemnego przyciągania wzrośnie sześciokrotnie.



Grawitacyjne przyciąganie złożonych ciał

Jeżeli masa ciała zostanie podwojona, siła jego grawitacyjnego oddziaływania również wzrośnie dwukrotnie.

Możemy się teraz przekonać, dlaczego wszystkie ciała spadają na ziemię w tym samym tempie. Zgodnie z prawem grawitacji Newtona na ciało o dwukrotnie większej masie działa dwukrotnie większa siła grawitacji. Lecz skoro ciało ma dwukrotnie większą masę, jego przyspieszenie — zgodnie z drugim prawem Newtona — będzie odpowiednio mniejsze, o taki sam czynnik równy dwa. Zgodnie z prawami Newtona te dwa efekty wzajemnie się skasują i przyspieszenie będzie takie samo niezależnie od masy ciała.

Prawo grawitacji Newtona mówi także, że im dalej od siebie znajdują się dwa ciała, tym słabsza siła, z jaką na siebie działają. Gwiazda przyciąga planetę z siłą, która jest równa dokładnie jednej czwartej siły, z jaką podobna gwiazda przyciąga podobną planetę położoną o połowę bliżej. Prawo to z wielką dokładnością określa orbity Ziemi, Księżyca oraz planet. Gdyby grawitacyjne oddziaływanie gwiazdy zmieniało się z odległością trochę szybciej lub trochę wolniej niż w rzeczywistości, orbity planet nie byłyby eliptyczne; planety albo spadałyby wzdłuż spirali na Słońce, albo uciekałyby w przestrzeń.

Jedną z zasadniczych różnic między ideami Arystotelesa a Galileusza i Newtona polegała na tym, że Arystoteles wierzył w wyróżniony stan spo-

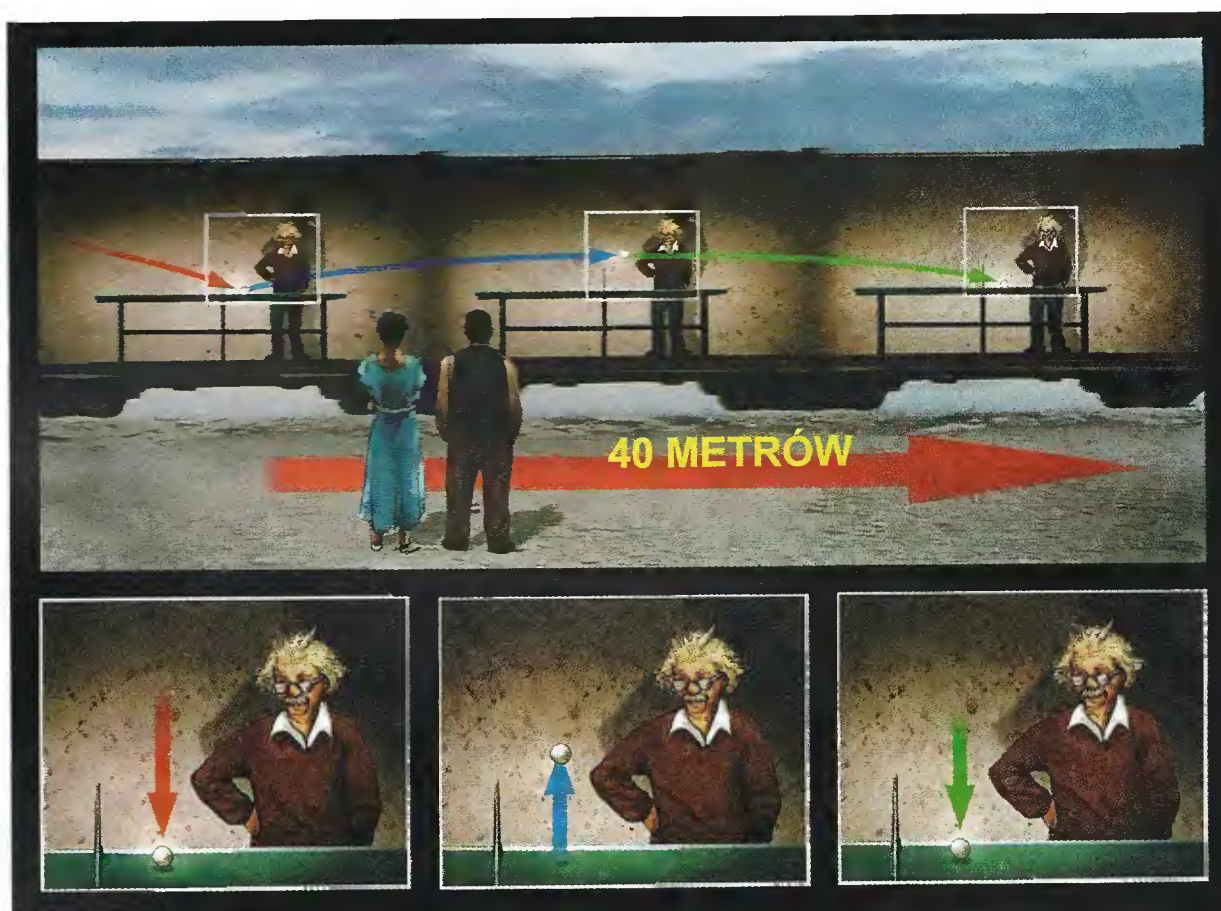
czynku, który każde ciało przyjmuje, gdy nie jest popychane przez żadną siłę lub impuls. W szczególności Arystoteles sądził, że Ziemia znajduje się w stanie spoczynku. Z praw Newtona wynika jednak, że nie istnieje wyróżniony standard spoczynku. Można równie dobrze powiedzieć, że ciało A jest w spoczynku, a ciało B porusza się ze stałą prędkością względem ciała A, lub że ciało B jest w spoczynku, a ciało A się porusza. Jeżeli pominiemy na moment wirowanie Ziemi wokół własnej osi oraz jej ruch po orbicie wokół Słońca, możemy stwierdzić, że Ziemia jest w spoczynku, a pociąg na jej powierzchni jedzie na północ z prędkością dziewięćdziesięciu kilometrów na godzinę, lub pociąg jest w spoczynku, a Ziemia porusza się na południe z prędkością dziewięćdziesięciu kilometrów na godzinę. Gdy wykonamy eksperymenty z poruszającymi się ciałami w pociągu, wszystkie prawa Newtona będą nadal spełnione. Rację ma Newton czy Arystoteles i jak można to sprawdzić?

Jeden z możliwych testów wyglądałby następująco: wyobraźmy sobie, że jesteśmy zamknięci w pudle i nie wiemy, czy pudło znajduje się na podłodze pociągu czy na twardej powierzchni Ziemi, która — według Arystotelesa — stanowi standard spoczynku. Czy da się to sprawdzić? Jeżeli tak, to być może Arystoteles ma rację — stan spoczynku na powierzchni Ziemi jest wyróżniony. Jeżeli jednak przeprowadzimy dowolnie wybrany eksperyment w pudle podróżującym w pociągu, wyniki będą dokładnie takie same, jakie uzyskalibyśmy w pudle znajdującym się na „stacjonarnym” peronie dworca (zakładając, że pociąg porusza się bez podskoków, zakrętów czy innych odstępstw od jednostajnego ruchu). Grając w ping-ponga w pociągu, stwierdzimy, że piłeczka zachowuje się dokładnie tak samo jak przy grze w ping-ponga na peronie. Jeżeli ponownie znajdziemy się w pudle i będziemy grać przy różnych prędkościach względem Ziemi — powiedzmy zero, pięćdziesiąt i dziewięćdziesiąt kilometrów na godzinę — piłeczka będzie się zachowywać dokładnie tak samo w każdej z tych sytuacji. Świat zachowuje się w taki, a nie inny sposób i to właśnie odzwierciedlają prawa Newtona: nie ma sposobu, aby stwierdzić, czy to pociąg, czy Ziemia się porusza. Koncepcja ruchu ma sens tylko wtedy, gdy dotyczy ruchu względem innych obiektów.

Dlaczego to jest takie istotne, czy rację miał Arystoteles czy Newton? Czy nie jest to wyłącznie filozoficzna dysputa sprowadzająca się do różnicy punktów widzenia? Czy kwestia ta jest istotna dla nauki? Brak absolutnego standardu spoczynku ma w istocie bardzo głębokie konsekwencje dla nauki: oznacza, że nie możemy stwierdzić, czy dwa zdarzenia zaszły w tym samym miejscu, jeżeli zaszły one w różnych chwilach.

Aby sobie to uzmysłwić, wyobraźmy sobie, że pasażer pociągu podzruca pionowo do góry piłeczkę, która następnie spada na blat stołu i odbija się dwukrotnie w odstępach jednej sekundy. Z punktu widzenia tej osoby położenia pierwszego i drugiego odbicia są oddalone w przestrzeni o zero. Dla kogoś stojącego obok torów te dwa odbicia zaszły w odległości około dwudziestu pięciu metrów, ponieważ mniej więcej tyle pociąg przejedzie w ciągu jednej sekundy. Według Newtona każdy z dwóch obserwatorów ma jednakowe prawo uważać, że to właśnie on pozostaje w spoczynku, więc oba powyższe punkty widzenia są jednakowo uprawnione. Wbrew temu, co sądził Arystoteles, położenia zdarzeń oraz odległości między nimi będą inne dla pasażera pociągu i dla dróżnika stojącego obok torów. Nie ma też żadnego powodu, aby wyróżniać punkt widzenia któregośkolwiek z tych dwóch obserwatorów.

Newtona bardzo niepokoił ten brak absolutnego położenia lub — co wychodzi na to samo — absolutnej przestrzeni, ponieważ nie pasował do koncepcji absolutnego Boga. W istocie Newton nie przyjmował do wiado-



Względność odległości
Odległość oraz trajektoria obiektu mogą być różne dla różnych obserwatorów.

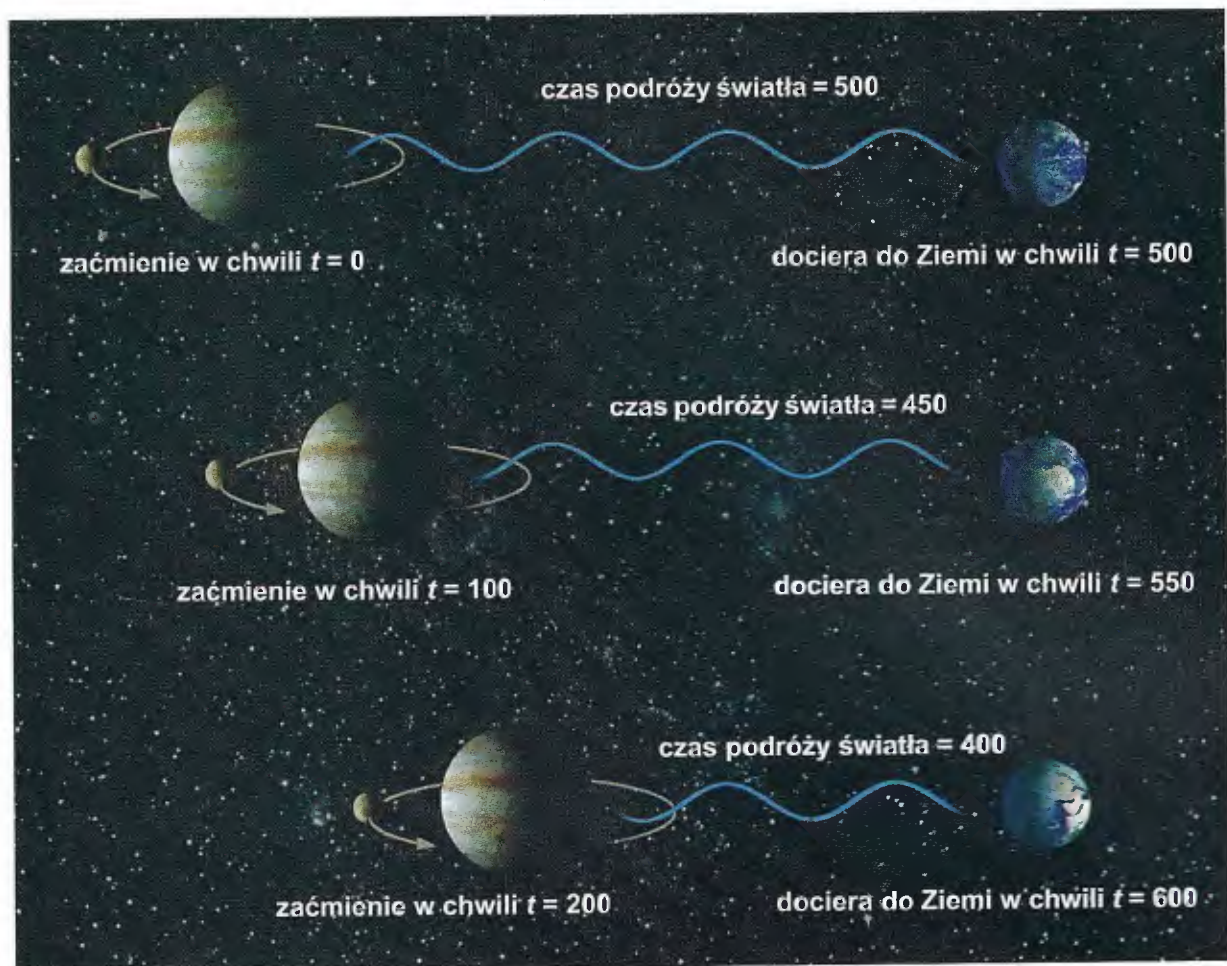
mości braku absolutnej przestrzeni, mimo że wynikał on wprost z jego własnych praw. Za ten irracjonalny pogląd był ostro krytykowany przez wielu ludzi, między innymi przez biskupa Berkeleya, filozofa, który uważał, że wszystkie materialne obiekty, wraz z przestrzenią i czasem, są iluzją. Gdy Samuel Johnson poznał opinię Berkeleya, zakrzyknął: „Oto, jak ją obalam!” — i kopnął w leżący obok głaz.

Zarówno Arystoteles, jak i Newton wierzyli w absolutny czas. Uważali, że można jednoznacznie zmierzyć przedział czasu między dwoma zdarzeniami i że wynik będzie taki sam niezależnie od tego, kto dokona pomiaru, jeżeli tylko użyty zostanie dobry zegar. W odróżnieniu od koncepcji absolutnej przestrzeni koncepcja absolutnego czasu jest spójna z prawami Newtona. Większość ludzi uznałaby to za zdroworozsądkowy punkt widzenia, lecz na początku dwudziestego wieku fizycy zdali sobie sprawę, że muszą zmienić swoje poglądy na temat czasu i przestrzeni. Jak zobaczymy, odkryli oni, że przedział czasu między dwoma zdarzeniami — podobnie jak odległość między punktami, w których odbiła się piłeczka pingpongowa — zależy od obserwatora. Odkryli także, że czas nie jest całkowicie oddzielny i niezależny od przestrzeni. Kluczowymi elementami tych odkryć były nowe koncepcje dotyczące właściwości światła, które wydają się sprzeczne z naszym codziennym doświadczeniem. Nasza pozornie zdroworozsądkowa intuicja działa wprawdzie całkiem dobrze, gdy mamy do czynienia z takimi obiektami jak jabłka lub planety, które poruszają się względnie powoli, ale zdrowy rozsądek kompletnie zawodzi, gdy w grę wchodzi ciała poruszające się z prędkościami zbliżonymi do prędkości światła.

ZASADA WZGLĘDNOŚCI

ŚWIATŁO PORUSZA SIĘ Z BARDZO DUŻĄ, lecz skończoną prędkością. W 1676 roku duński astronom Ole Christensen Rømer dokonał odkrycia, dzięki któremu po raz pierwszy w historii potwierdzona została skończona prędkość światła. Wokół Jowisza krążą księżyce, które od czasu do czasu znikają z pola widzenia, ponieważ przechodzą za tarczą swojej olbrzymiej planety. Te zaćmienia księżyców Jowisza powinny zachodzić w regularnych odstępach czasu, lecz Rømer zauważył, że tak nie jest. Czy to możliwe, że księżyce w jakiś sposób zwalniają i przyspieszają swój ruch orbitalny? Rømer zaproponował inne wyjaśnienie. Gdyby światło poruszało się z nieskończoną prędkością, to na Ziemi obserwowalibyśmy te zaćmienia w regularnych odstępach czasu, dokładnie w tych samych momentach, w których zachodzą. Byłoby to swego rodzaju tykanie kosmicznego zegara. Gdyby światło poruszało się z nieskończoną prędkością, natychmiast pokonywałoby dowolną odległość, więc wskazania kosmicznego zegara nie zmieniałyby się, gdyby Jowisz znalazł się nieco bliżej lub nieco dalej od Ziemi.

Załóżmy jednak, że światło porusza się ze skończoną prędkością. W takim razie zaobserwujemy każde zaćmienie dopiero jakiś czas po tym, jak dany księżyc znajdzie się za tarczą Jowisza. Opóźnienie obserwacji zależy bowiem od prędkości światła o r a z od odległości Jowisza od Ziemi. Gdyby ta odległość była zawsze taka sama, opóźnienie byłoby zawsze takie samo dla każdego zaćmienia. Tak jednak nie jest. Gdy Jowisz zbliża się do Ziemi, „sygnał” o każdym kolejnym zaćmieniu ma coraz mniejszy dystans do pokonania, więc kolejne sygnały docierają coraz szybciej w porównaniu z hipotetyczną sytuacją, w której Jowisz pozostawałby w niezmiennej odległości. Z analogicznych powodów coraz później widzimy kolejne zaćmienia, gdy Jowisz oddala się od Ziemi. Te odchylenia częstości obserwacji zaćmień — w porównaniu z faktyczną częstością zaćmień — zależą od prędkości światła, co pozwala zmierzyć tę prędkość. To właśnie zrobił



Prędkość światła i częstotliwości zaćmień

Obserwowane częstotliwości zaćmień księżyców Jowisza zależą zarówno od samych momentów zaćmień, jak i od czasu, w jakim światło dociera od Jowisza do Ziemi. Dlatego zaćmienia wydają się częstsze, gdy Jowisz zbliża się do Ziemi, a rzadsze, gdy się oddala. Dla uwidocznienia tego efektu zmiany odległości obu planet na rysunku są znacznie przesadzone.

Rømer. Zauważył on, że zaćmienia jednego z księżyców Jowisza zachodzą częściej w tych porach roku, gdy Ziemia zbliża się do Jowisza, natomiast wtedy, gdy planety oddalają się od siebie, zaćmienia zachodzą rzadziej. Zaobserwowane różnice Rømer wykorzystał do obliczenia prędkości światła. Dane dotyczące odległości Ziemi od Jowisza nie były jednak zbyt dokładne, w wyniku czego otrzymał dla prędkości światła wartość około 220 000 kilometrów na sekundę, znacznie mniejszą od obecnie przyjmowanej wartości około 300 000 kilometrów na sekundę. Niemniej było to wybitne osiągnięcie. Rømer nie tylko udowodnił, że prędkość światła jest

skończona, lecz także zmierzył ją*. Warto przy tym zwrócić uwagę, że ogłosił swoje odkrycie jedenaście lat przed publikacją dzieła *Principia Mathematica* Newtona.

Poprawna teoria propagacji światła pojawiła się dopiero w 1865 roku, gdy brytyjski fizyk James Clerk Maxwell zdołał zunifikować dwie cząstkowe teorie opisujące zjawiska elektryczne i magnetyczne. Zarówno elektryczność, jak i magnetyzm były wprawdzie znane jeszcze w starożytności; lecz dopiero w osiemnastym wieku brytyjski chemik Henry Cavendish i francuski fizyk Charles Augustin de Coulomb odkryli ilościowe prawa dotyczące sił działających między dwoma elektrycznie naładowanymi ciałami. Kilkadziesiąt lat później, w pierwszej połowie dziewiętnastego wieku, fizycy zdołali odkryć analogiczne prawa rządzące siłami magnetycznymi. Ukoronowaniem prac osiemnasto- i dziewiętnastowiecznych uczonych były równania sformułowane przez Maxwella, które nie opisują jednak bezpośrednio elektrycznych i magnetycznych sił działających wprost między cząstkami. W ramach stworzonego formalizmu matematycznego równania te opisują pola wytwarzane przez ładunki oraz prądy elektryczne w otaczającej je przestrzeni. Pola te działają siłami na inne ładunki i prądy znajdujące się w tej przestrzeni. Maxwell odkrył, że pojedyncze pole jest odpowiedzialne zarówno za siły elektryczne, jak i magnetyczne. Elektryczność i magnetyzm stanowią zatem nieodłączne atrybuty tej samej siły. Maxwell nazwał ją siłą elektromagnetyczną, a pole, które ją przenosi, polem elektromagnetycznym.

Równania Maxwella przewidywały także, że w polu elektromagnetycznym mogą istnieć zaburzenia, które przemieszczają się jak fala z ustaloną prędkością, podobnie jak fala na powierzchni jeziora. Gdy obliczył tę prędkość, okazało się, że jest ona równa prędkości światła! Obecnie wiemy, że odkryte przez Maxwella fale są widoczne dla ludzkiego oka jako światło, gdy długość fali mieści się w zakresie od czterdziestu do osiemdziesięciu milionowych części centymetra (fala przemieszcza się w postaci szeregu wierzchołków i dolin — długość fali to odległość dwóch kolejnych wierzchołków lub dwóch kolejnych dolin). Fale o długości mniejszej od długości fali świetlnej są obecnie znane jako fale ultrafioletowe, promienie X oraz gamma. Fale o długości większej od długości fali świetlnej to fale radiowe (metr lub więcej), mikrofałe (około centymetra) lub fale podczerwone

* Rømer jedynie wyznaczył czas, jaki światło potrzebuje na przebycie średnicy orbity Ziemi. Wartość liczbową prędkości światła prawdopodobnie podał Christiaan Huygens, na podstawie danych otrzymanych od Rømera.



Długość fali

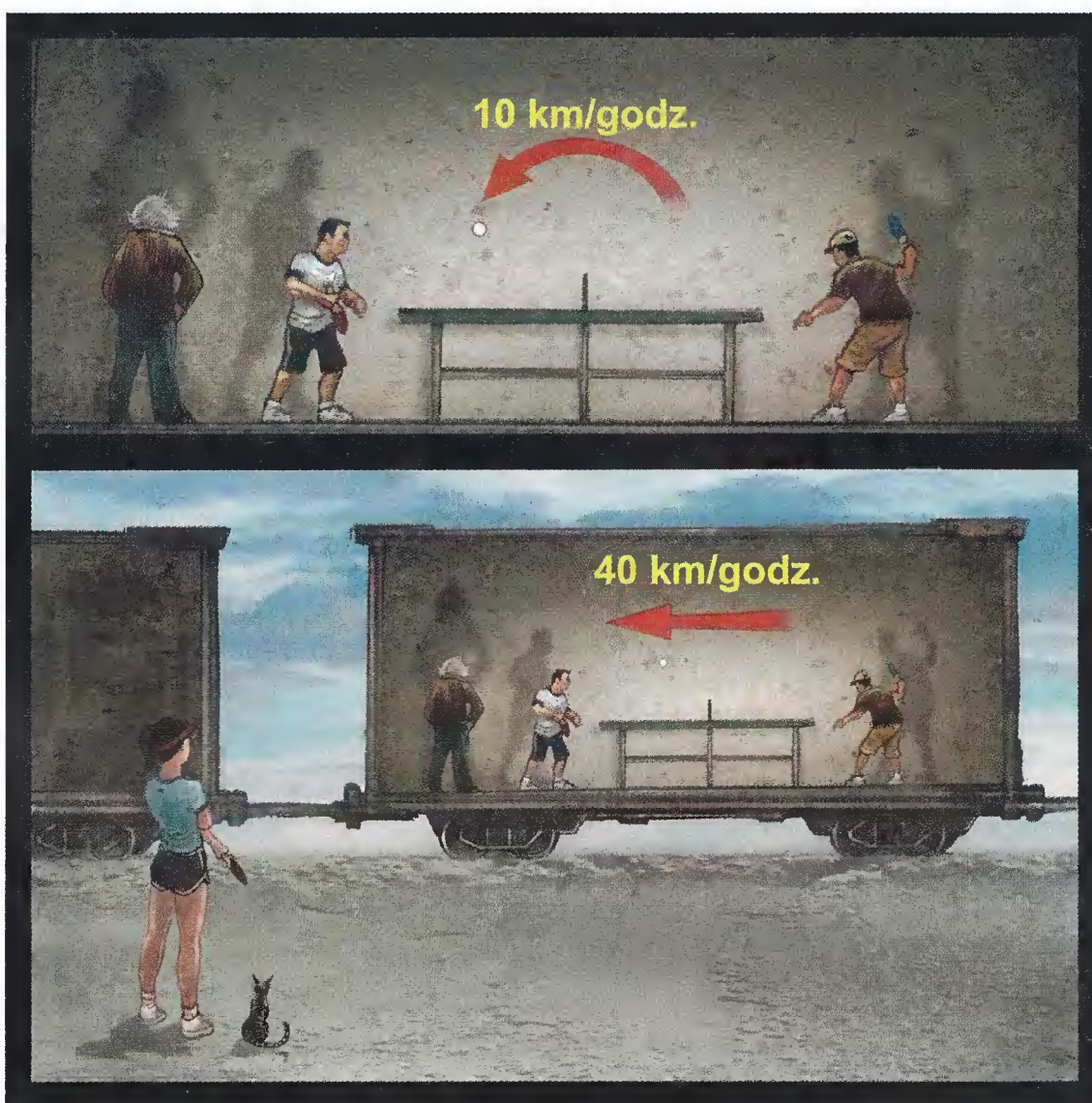
Długość fali to odległość dwóch kolejnych grzbietów lub dolin.

(mniej niż jedna setna centymetra, lecz więcej niż długość fali z zakresu widzialnego).

Z teorii Maxwella wynikał także wniosek, że fale radiowe lub świetlne powinny podróżować z pewną ustaloną prędkością, co było trudne do pogodzenia z teorią Newtona, zgodnie z którą nie istnieje absolutny standard spoczynku. Skoro nie ma standardu spoczynku, nie może być także uniwersalnej zgody co do prędkości jakiegokolwiek obiektu. Aby zrozumieć tę sprzeczność, wyobraźmy sobie ponownie grę w ping-ponga w pociągu. Jeżeli odbijemy piłeczkę w kierunku ruchu pociągu z prędkością, którą nasz partner oceni jako dziesięć kilometrów na godzinę, to obserwator na peronie będzie widział piłeczkę poruszającą się z prędkością stu kilometrów na godzinę, z czego dziesięć przypada na ruch piłeczki względem pociągu, a dziewięćdziesiąt na ruch pociągu względem peronu. Jaka zatem jest prędkość piłeczki — dziesięć czy sto kilometrów na godzinę? W jaki sposób ją definiujemy — względem pociągu czy względem Ziemi? Bez

absolutnego standardu spoczynku nie można przypisać piłeczce absolutnej prędkości. Ta sama piłeczka może mieć dowolną prędkość zależnie od układu odniesienia, w którym została zmierzona. Według teorii Newtona tak samo powinno być dla światła. Natomiast w teorii Maxwella fale świetlne powinny podróżować z pewną ustaloną prędkością. Co dokładnie to oznacza?

Aby pogodzić teorię Maxwella z prawami Newtona, wysunięto sugestię, że wszędzie w przestrzeni, nawet w „pustej” próżni, istnieje pewna substancja zwana eterem. Idea eteru miała jeszcze pewną dodatkową zale-



Różne prędkości piłeczki pingpongowej
Zgodnie z teorią względności pomiary prędkości wykonane przez różnych obserwatorów mogą się różnić, lecz są jednakowo ważne.

tę dla naukowców, którzy uważali, że podobnie jak fale na wodzie wymagają istnienia wody, a fale dźwiękowe powietrza, fale energii elektromagnetycznej powinny także rozchodzić się w jakimś ośrodku. Zgodnie z tym punktem widzenia fale świetlne poruszają się w eterze, tak jak fale dźwiękowe w powietrzu, a ich „prędkość”, wynikająca z równań Maxwella, powinna zatem być mierzona względem eteru. Różni obserwatorzy zmierzyliby różne prędkości nadbiegającego do nich światła, lecz prędkość światła względem eteru byłaby zawsze taka sama.

Tę ideę można przetestować. Wyobraźmy sobie światło emitowane przez pewne źródło. Zgodnie z teorią eteru światło podróżuje względem eteru z prędkością światła. Jeżeli obserwator będzie się poruszał względem eteru w kierunku źródła, to prędkość, z jaką światło będzie biec w jego stronę, będzie sumą prędkości światła względem eteru oraz prędkości obserwatora względem eteru. Będzie zatem większa niż w przypadku, gdyby obserwator poruszał się w innym kierunku lub pozostawał nieruchomy względem eteru. Prędkość światła jest jednak tak duża w porównaniu z prędkościami, z jakimi my moglibyśmy się poruszać względem źródła, że ta różnica prędkości była bardzo trudna do zmierzenia.

W 1887 roku Albert Michelson (który później, jako pierwszy Amerykanin, otrzymał Nagrodę Nobla) oraz Edward Morley z Case School of Applied Science (obecnie Case Western Reserve University) w Cleveland wykonali bardzo trudny i precyzyjny eksperyment. Wykorzystali oni fakt, że skoro Ziemia krąży wokół Słońca z prędkością niemal trzydziestu kilometrów na sekundę, to ich laboratorium w Cleveland musi wraz z całą planetą poruszać się z tą stosunkowo dużą prędkością względem eteru. Nikt oczywiście nie wiedział, w jakim kierunku i z jaką prędkością Słońce porusza się względem eteru ani czy w ogóle się porusza. Aby uwzględnić ten nieznaną czynnik, Michelson i Morley powtarzali swój eksperyment w różnych porach roku, gdy Ziemia znajdowała się w różnych miejscach swojej wokółsłonecznej orbity. Eksperyment polegał na porównaniu prędkości światła mierzonej w kierunku ruchu Ziemi w eterze (ruch w kierunku źródła światła) z prędkością światła biegnącego pod kątem prostym do kierunku ruchu (brak ruchu w kierunku źródła). Ku wielkiemu zaskoczeniu Michelsona i Morleya prędkość światła w obu kierunkach okazała się dokładnie taka sama!

W latach 1887-1905 podjęto wiele prób uratowania teorii eteru. Najbardziej znaną propozycję wysunął holenderski fizyk Hendrik Lorentz. Aby wyjaśnić wyniki eksperymentu Michelsona-Morleya, sformułował on hipotezę, zgodnie z którą na skutek ruchu ciał względem eteru dochodzi do zmniejszania się ich rozmiarów oraz spowalniania poruszających się ze-

garów. W 1905 roku nikomu nieznanemu urzędnik szwajcarskiego urzędu patentowego, Albert Einstein, opublikował artykuł, w którym zwrócił uwagę, że cała idea eteru jest w ogóle niepotrzebna, pod warunkiem że odrzuci się koncepcję absolutnego czasu (poniżej wyjaśniamy dlaczego). Tę samą sugestię wysunął kilka tygodni później czołowy francuski matematyk, Henri Poincaré. Argumenty Einsteina miały jednak bardziej fizyczny charakter, natomiast Poincaré postrzegał ten problem jako czysto matematyczne zagadnienie i do końca życia nie zaakceptował fizycznej interpretacji sformułowanej przez Einsteina.

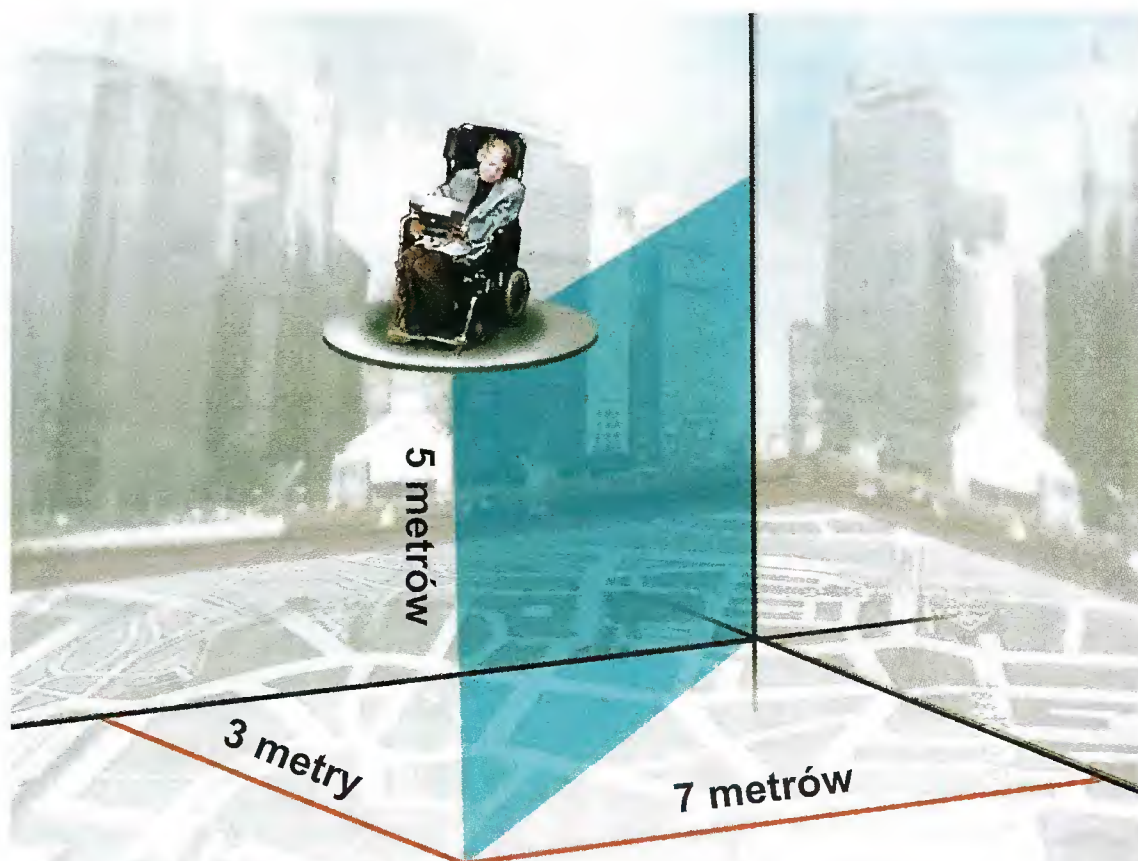
Zasada względności, podstawowy postulat teorii względności Einsteina, stwierdza, że prawa fizyki powinny być takie same dla wszystkich swobodnie poruszających się obserwatorów niezależnie od ich prędkości. Prawa Newtona spełniały to wymaganie, a Einstein rozszerzył tę ideę, aby obejmowała także teorię Maxwella. Innymi słowy, skoro teoria Maxwella stwierdza, że prędkość światła ma pewną określoną wartość, to wszyscy swobodnie poruszający się obserwatorzy muszą zmierzyć tę samą wartość niezależnie od tego, jak szybko się oddalają lub zbliżają do źródła światła. Ta prosta idea całkowicie wyjaśniała — bez odwoływania się do eteru lub jakiegokolwiek innego wyróżnionego układu odniesienia — znaczenie prędkości światła w równaniach Maxwella, lecz miała także pewne zadziwiające i często sprzeczne z intuicją konsekwencje.

Na przykład postulat, że wszyscy obserwatorzy muszą zmierzyć taką samą prędkość światła, zmusza nas do zmiany koncepcji czasu. W rozdziale 4 opisaliśmy hipotetyczną sytuację, w której pasażer pociągu odbijający piłeczkę może powiedzieć, że podskoczyła ona jedynie o kilka centymetrów, natomiast obserwator stojący na peronie stwierdzi, że piłeczka przebyła około dwudziestu pięciu metrów. Na podobnej zasadzie, gdyby pasażer pociągu zaświecił latarkę, obaj obserwatorzy nie zgodziliby się co do odległości pokonanej przez światło. A skoro prędkość jest równa odległości podzielonej przez czas, jedyny sposób, aby mogli się różnić przy pomiarze odległości i równocześnie zgodzić co do prędkości, polega na tym, że muszą się także różnić w kwestii czasu potrzebnego na pokonanie tej odległości. Innymi słowy, teoria względności wymaga od nas porzucenia idei absolutnego czasu! Każdy obserwator musi mieć swoją własną miarę czasu, wskazywaną przez jego własny zegar, a identyczne zegary będące w posiadaniu różnych obserwatorów nie muszą dawać identycznych wskazań.

W teorii względności nie ma potrzeby wprowadzania koncepcji eteru, który — jak wykazał eksperyment Michelsona-Morleya — nie został doświadczalnie wykryty. Teoria względności zmusza nas jednak do fundamentalnej zmiany naszych idei dotyczących przestrzeni i czasu. Musimy

zaakceptować fakt, że czas nie jest całkowicie rozłączny i niezależny od przestrzeni, lecz jest z nią połączony, tworząc byt zwany czasoprzestrzenią. Nie są to idee łatwe do zrozumienia. Nawet w społeczności fizyków teoria względności dopiero po wielu latach została powszechnie zaakceptowana. Stanowi ona świadectwo wyobraźni Einsteina, który zdołał ją odkryć, a także dowód jego zaufania do sprzecznej z intuicją logiki, dzięki której wywiódł z teorii wszystkie jej konsekwencje, mimo że wydawało się, iż prowadzi ona do nieco dziwacznych wniosków.

Aby określić położenie jakiegoś punktu w przestrzeni, podajemy zazwyczaj trzy liczby zwane współrzędnymi. Możemy na przykład powiedzieć, że znajduje się on siedem metrów od jednej ściany, trzy metry od drugiej i pięć metrów nad podłogą. Możemy podać szerokość i długość



Współrzędne w przestrzeni

Gdy mówimy, że przestrzeń ma trzy wymiary, mamy na myśli, że potrzebne są trzy liczby, czyli współrzędne, aby określić położenie dowolnego punktu. Jeżeli do tego opisu dodamy czas, to przestrzeń stanie się czterowymiarową czasoprzestrzenią.

geograficzną oraz wysokość nad poziomem morza. Możemy dowolnie wybrać trzy współrzędne, aczkolwiek ich praktyczna stosowalność jest zwykle ograniczona. Określanie położenia Księżyca w kategoriach jego odległości na północ i na zachód od Piccadilly Circus, wyrażonych w kilometrach oraz w metrach nad poziomem morza, nie byłoby zbyt wygodne. Wolelibyśmy raczej podać odległość Księżyca od Słońca, odległość od płaszczyzny orbitalnej planet oraz kąt między linią poprowadzoną od Księżyca do Słońca a linią poprowadzoną od Księżyca do jakiejś pobliskiej gwiazdy, na przykład Proxymy Centauri. Nawet takie współrzędne nie byłyby jednak zbyt wygodne przy określaniu położenia Słońca w Galaktyce lub położenia Galaktyki w lokalnej grupie galaktyk. W gruncie rzeczy cały wszechświat można przedstawić jako zbiór nakładających się skrawków i w każdym z nich użyć innego układu trzech współrzędnych do określenia położenia.

W teorii względności dowolne zdarzenie — czyli dowolne zjawisko, które ma miejsce w określonym punkcie przestrzeni i w określonym momencie czasu — może być przedstawione w czasoprzestrzeni za pomocą czterech liczb, czyli współrzędnych czasoprzestrzennych. Także i w tym przypadku mamy pełną swobodę wyboru układu współrzędnych — możemy użyć dowolnego, poprawnie zdefiniowanego układu współrzędnych przestrzennych oraz dowolnej miary czasu. W teorii względności nie ma jednak istotnego rozróżnienia między współrzędnymi przestrzennymi i czasowymi, podobnie jak nie ma istotnej różnicy między dwiema współrzędnymi przestrzennymi. Moglibyśmy wybrać nowy układ współrzędnych, w którym jedna z nowych współrzędnych przestrzennych jest kombinacją dwóch starych współrzędnych przestrzennych. Zamiast mierzyć położenie punktu na Ziemi w kilometrach na północ od Piccadilly oraz w kilometrach na zachód od Piccadilly, moglibyśmy na przykład określać je w kilometrach na północny wschód od Piccadilly oraz w kilometrach na północny zachód od Piccadilly. Na podobnej zasadzie moglibyśmy zastosować nową współrzędną czasową, która byłaby zdefiniowana jako stara współrzędna (liczona w sekundach) plus odległość (w sekundach świetlnych) na północ od Piccadilly.

Kolejną powszechnie znaną konsekwencją teorii względności jest równoważność masy i energii wyrażona w słynnym równaniu $E = mc^2$ (gdzie E jest energią, m masą, a c prędkością światła). Równanie to jest często używane do obliczania ilości energii, jaka zostanie wyprodukowana, jeżeli kawałek materii zostanie na przykład przekształcony w czystą energię elektromagnetyczną. (Prędkość światła jest bardzo dużą liczbą, więc taka konwersja daje olbrzymie ilości energii; w bombie, która zniszczyła Hiroszimę, ilość materii zamienionej w energię była mniejsza od jednej uncji

[ok. 28 gramów]). Równanie to mówi także, że jeśli energia jakiegoś ciała wzrasta, musi wzrastać także jego masa. A masa jest miarą bezwładności, czyli oporu, jaki ciało stawia przyspieszeniu lub zmianie prędkości.

Jedną z form energii jest energia ruchu zwana energią kinetyczną. Podobnie jak w przypadku rozpędzania samochodu, zwiększanie prędkości dowolnego ciała wymaga energii. Energia kinetyczna poruszającego się ciała jest równa energii, którą trzeba zużyć, aby je rozpędzić. Im szybciej ciało się porusza, tym większa jest jego energia kinetyczna. Z równoważności energii i masy wynika jednak, że energia kinetyczna ciała powiększa jego masę, więc im szybciej ciało się porusza, tym trudniejsze jest dalsze zwiększanie jego prędkości.

Ten efekt jest jednak istotny tylko dla obiektów poruszających się z prędkościami bliskimi prędkości światła. Na przykład przy prędkości równej 10 procent prędkości światła masa ciała jest tylko o 0,5 procenta większa od jego masy spoczynkowej, natomiast przy prędkości równej 90 procent prędkości światła masa byłaby już ponaddwukrotnie większa. W miarę zbliżania się prędkości ciała do prędkości światła jego masa rośnie coraz szybciej, a zatem coraz więcej energii potrzeba do jego dalszego rozpędzania. Zgodnie z teorią względności nie można osiągnąć prędkości światła, ponieważ masa stałaby się wtedy nieskończona, a z zasady równoważności masy i energii wynika, że wymagałoby to nieskończonej ilości energii. Z tego powodu wszystkie normalne ciała są skazane na poruszanie się z prędkościami mniejszymi od prędkości światła. Tylko światło lub inne pozbawione masy spoczynkowej fale mogą się poruszać z prędkością światła.

Teoria względności Einsteina z 1905 roku nosi nazwę szczególnej teorii względności, ponieważ wyjaśnia ona, dlaczego prędkość światła jest taka sama dla wszystkich obserwatorów, a także opisuje, co się dzieje, gdy ciała poruszają się z prędkościami porównywalnymi z prędkością światła, lecz nie jest spójna z teorią grawitacji Newtona. Teoria Newtona stwierdza, że każde dwa ciała przyciągają się z siłą, która zależy od ich wzajemnej odległości w danym momencie. Oznacza to, że jeżeli jedno z tych ciał się przemieści, siła działająca na drugie ciało zmieni się w sposób natychmiastowy. Teoria Maxwella mówi, że gdyby Słońce nagle zniknęło, na Ziemi zrobiłoby się ciemno dopiero po ośmiu minutach (mniej więcej tyle czasu światło słoneczne potrzebuje na dotarcie do Ziemi). Lecz zgodnie z teorią Newtona Ziemia natychmiast przestałaby odczuwać przyciąganie Słońca i opuściłaby orbitę. Grawitacyjny skutek zniknięcia Słońca dotarłby do nas z nieskończoną prędkością, a nie — jak wymaga szczególna teoria względności — z prędkością mniejszą lub równą prędkości światła. W latach

1908-1914 Einstein intensywnie poszukiwał teorii grawitacji, która byłaby spójna ze szczególną teorią względności. W końcu w 1915 roku sformułował rewolucyjną teorię, którą obecnie nazywamy ogólną teorią względności.

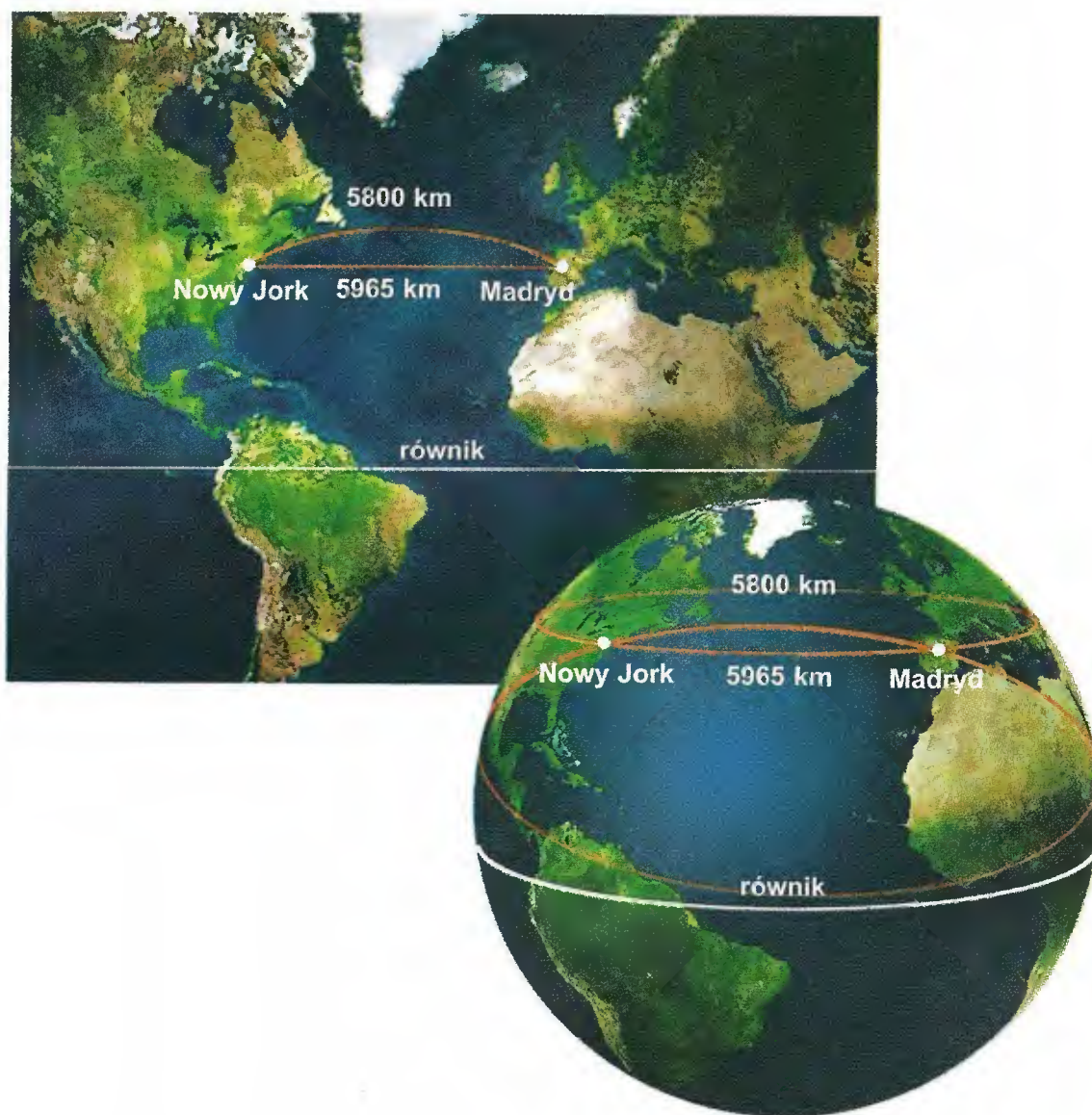
ZAKRZYWIONA PRZESTRZEŃ

OGÓLNA TEORIA WZGLĘDNOŚCI EINSTEINA jest oparta na rewolucyjnej sugestii, że grawitacja nie jest taką samą siłą jak inne siły w przyrodzie, lecz jest konsekwencją zakrzywienia czasoprzestrzeni. Wszystkie poprzednie teorie opierały się na założeniu, że czasoprzestrzeń jest płaska, natomiast w ogólnej teorii względności czasoprzestrzeń może być zakrzywiona, lub „pofałdowana” [ang. *warped*] przez znajdującą się w niej masę oraz energię. Ciała poruszające się w przestrzeni, na przykład Ziemia, nie poruszają się po krzywoliniowych orbitach na skutek działania siły zwanej grawitacją, lecz dlatego że podążają wzdłuż trajektorii, która jest najbardziej zbliżona do prostej drogi w zakrzywionej przestrzeni. Trajektorja ta, zwana linią geodezyjną (lub w skrócie geodezyjną), jest zdefiniowana jako najkrótsza (lub najdłuższa) droga między dwoma pobliskimi punktami.

Płaszczyzna stanowi przykład dwuwymiarowej płaskiej przestrzeni, w której geodezyjne są liniami prostymi. Powierzchnia Ziemi również jest dwuwymiarowa, lecz stanowi ona przestrzeń zakrzywioną, w której geodezyjnymi są fragmenty okręgów tak zwanych kół wielkich. Kołami wielkimi na Ziemi są równik, południki, a także każde inne koło, którego środek pokrywa się ze środkiem Ziemi. (Określenie „koło wielkie” wzięło się stąd, że jest to największe koło, jakie można wpisać w kulę). Linia geodezyjna stanowi najkrótszą drogę między dwoma lotniskami, dlatego długodystansowe samoloty zawsze latają wzdłuż geodezyjnej. Na przykład z Nowego Jorku do Madrytu można lecieć, kierując się wskazaniem kompasu, cały czas na wschód wzdłuż ich wspólnego równoleżnika, pokonując dystans 5965 kilometrów. Tę samą podróż można jednak skrócić o 165 km, jeżeli polecą wzdłuż koła wielkiego, kierując się najpierw na północny wschód, w trakcie lotu stopniowo skręcając na wschód, a następnie na południowy wschód. Wygląd tych dwóch krzywych na mapie niekoniecznie odzwierciedla faktyczny stan rzeczy, ponieważ powierzchnia Ziemi na

mapie jest zniekształcona (spłaszczona). Gdy idziemy „prosto” na wschód, nie poruszamy się prosto, w każdym razie nie w sensie najkrótszej drogi, wzdłuż linii geodezyjnej.

W ogólnej teorii względności ciała zawsze poruszają się wzdłuż linii geodezyjnych w czterowymiarowej przestrzeni. Gdy w czterowymiarowej przestrzeni nie ma materii, takie geodezyjne odpowiadają liniom prostym



Odległości na globie

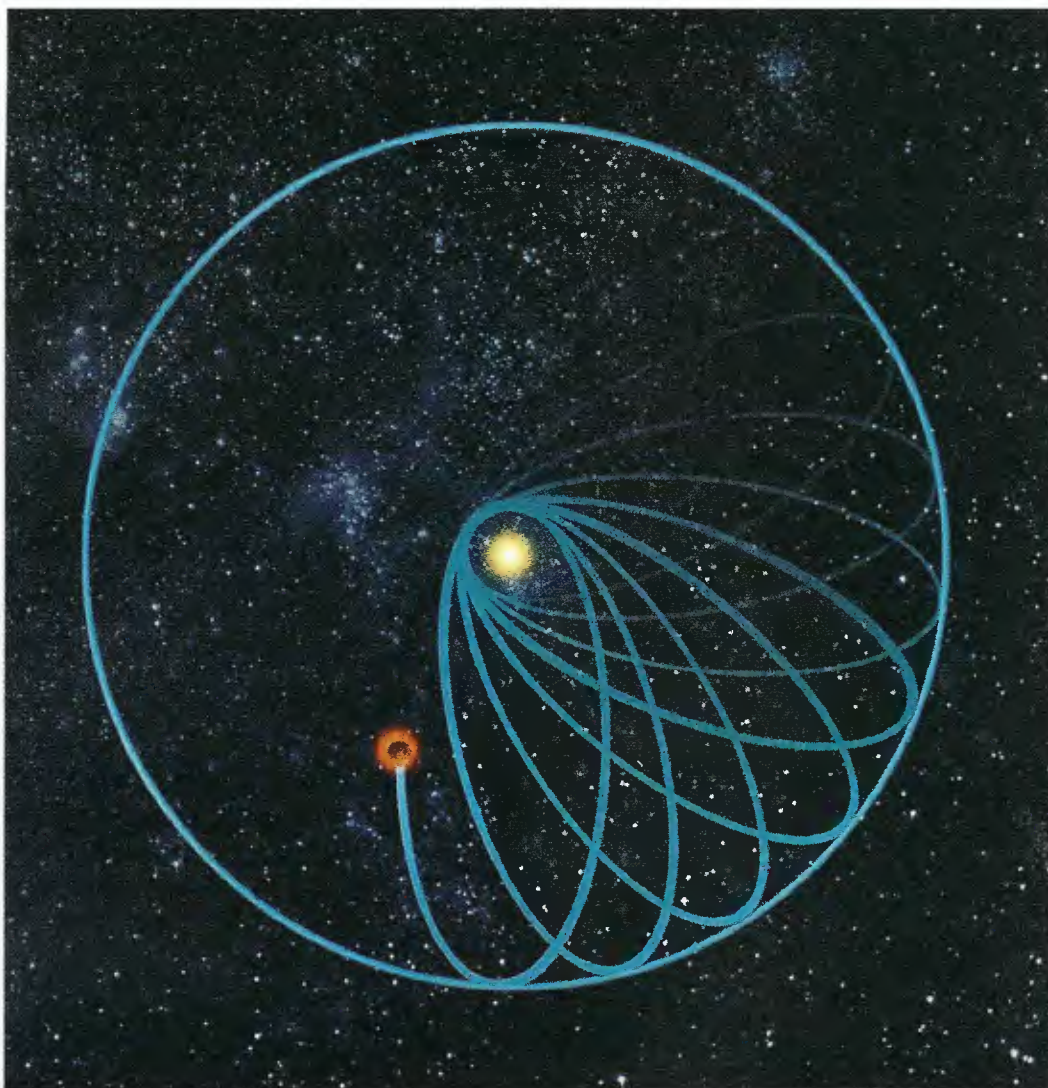
Najkrótsza odległość między dwoma punktami na globie biegnie wzdłuż okręgu koła wielkiego, na płaskiej mapie nie odpowiada jej linia prosta.



Trajektoria cienia

Trajektoria statku kosmicznego poruszającego się wzdłuż linii prostej wydaje się zakrzywiona, gdy zrzutujemy ją na dwuwymiarową powierzchnię globu.

w trójwymiarowej przestrzeni. W obecności materii czterowymiarowa przestrzeń jest zniekształcona, co powoduje, że trajektorie ciał w trójwymiarowej przestrzeni stają się zakrzywione w taki sposób, który w starej, Newtonowskiej teorii był wyjaśniany przez efekty grawitacyjnego oddziaływania ciał. Przypomina to trochę obserwowanie cienia samolotu lecącego nad jakimś górzystym terenem. Samolot może lecieć na pewnej wysokości wzdłuż linii prostej w trójwymiarowej przestrzeni, lecz jego cień będzie się poruszał wzdłuż zakrzywionej trajektorii na dwuwymiarowej powierzchni górzystego terenu. Możemy także wyobrazić sobie statek kosmiczny lecący wzdłuż linii prostej nad biegunem północnym. Jeśli zrzutujemy się jego trajektorię na dwuwymiarową powierzchnię Ziemi, okaże się, że

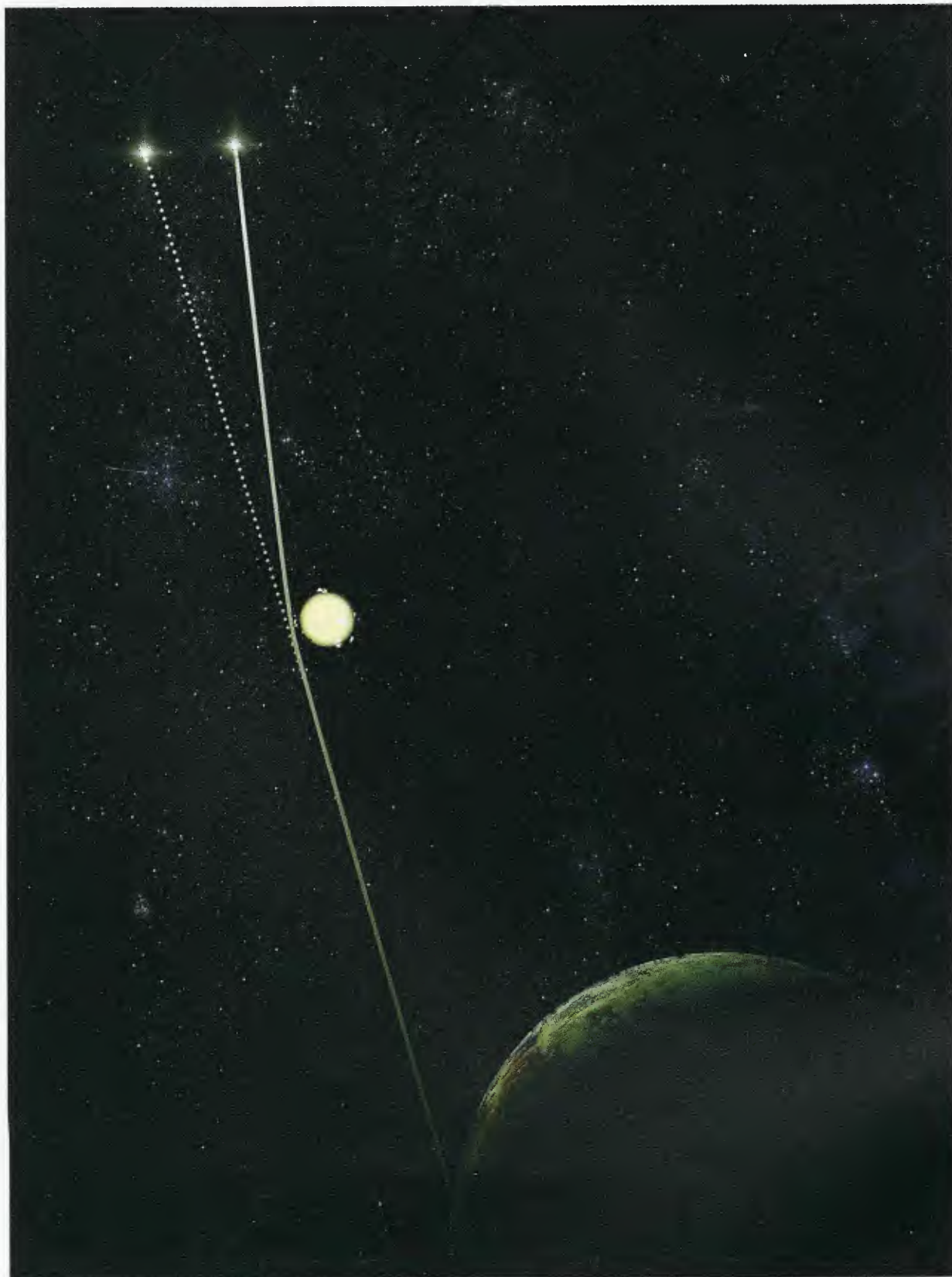


Precesja orbity Merkurego

Merkury okrąży Słońce wzdłuż elipsy, lecz oś tej elipsy powoli się obraca, wykonując pełny obrót mniej więcej raz na 360 000 lat.

zakreśla ona fragment okręgu pokrywający się z południkiem. Wprawdzie trudniej to sobie wyobrazić, lecz masa Słońca zakrzywia czasoprzestrzeń w taki sposób, że Ziemia porusza się wzdłuż linii prostej w czterowymiarowej czasoprzestrzeni, natomiast nam się wydaje, że zakreśla niemal kołową orbitę w trójwymiarowej przestrzeni.

Orbity planet obliczone na podstawie ogólnej teorii względności są w istocie niemal dokładnie takie same jak orbity przewidywane przez Newtonowską teorię grawitacji, mimo że zarówno same teorie, jak i stosowane w nich metody matematyczne są dość odmienne. Największe różnice dotyczą orbity Merkurego, który z racji swego położenia najbliższej Słońca znajduje się w najsilniejszym polu grawitacyjnym ze wszystkich planet.



Zakrzywienie światła w pobliżu Słońca

Gdy Słońce znajduje się niemal dokładnie pomiędzy Ziemią a odległą gwiazdą, jego pole grawitacyjne ugina światło gwiazdy, co powoduje pozorną zmianę położenia gwiazdy na niebie.

Orbita Merkurego nie jest idealnie kołowa, lecz stanowi dość wydłużoną elipsę. Ogólna teoria względności przewiduje, że oś tej elipsy powinna się obracać wokół Słońca w tempie około jednego stopnia na dziesięć tysięcy lat. Ten stosunkowo nieduży efekt został zauważony na długo przed 1915 rokiem i posłużył jako jeden z pierwszych obserwacyjnych dowodów na rzecz teorii Einsteina. W późniejszych latach (jeszcze mniejsze) odchylenia orbit pozostałych planet zostały zmierzone za pomocą radarów i również okazały się zgodne z przewidywaniami ogólnej teorii względności.

Promienie świetlne muszą także poruszać się w czasoprzestrzeni wzdłuż geodezyjnych. Jeżeli zatem przestrzeń jest zakrzywiona, to również światło nie porusza się wzdłuż linii prostej, co oznacza, że ogólna teoria względności przewiduje zakrzywienie trajektorii światła przez pola grawitacyjne. Na przykład promień światła biegnący w pobliżu Słońca powinien lekko ugiąć się w jego kierunku pod wpływem masy Słońca. W takim razie światło jakiejś odległej gwiazdy, które przebiega w pobliżu Słońca, powinno zostać ugięte pod pewnym niewielkim kątem. Z punktu widzenia obserwatora na Ziemi spowoduje to taki efekt, jakby gwiazda znajdowała się w innym położeniu na niebie niż w rzeczywistości. Oczywiście gdyby światło gwiazdy zawsze przechodziło blisko Słońca, nie potrafilibyśmy stwierdzić, czy faktycznie jest ono odchylane, czy raczej gwiazda rzeczywiście znajduje się tam, gdzie ją widzimy. Lecz w miarę jak Ziemia krąży wokół Słońca, różne gwiazdy trafiają w pobliże łączącej je linii i przechodzą za tarczą Słońca. W tych momentach ich światło ulega ugięciu, w wyniku czego ich pozorne położenia na niebie względem innych gwiazd ulegają zmianie.

W normalnych warunkach niezwykle trudno jest zaobserwować ten efekt, ponieważ światło słoneczne uniemożliwia obserwowanie gwiazd, które znajdują się w pobliżu Słońca. Obserwacja taka jest jednak możliwa w trakcie zaćmienia Słońca, gdy Księżyc blokuje światło słoneczne. Ugięcie promieni światła, przewidziane przez Einsteina, nie mogło być zbadane od razu w 1915 roku, ponieważ trwała pierwsza wojna światowa. Dopiero w 1919 roku brytyjska ekspedycja naukowa potwierdziła ugięcie światła przez Słońce, wykonując obserwacje gwiazd w trakcie zaćmienia Słońca na zachodnim wybrzeżu Afryki. Potwierdzenie niemieckiej teorii przez brytyjskich naukowców zostało uznane za wielki akt pojednania między dwoma krajami, które jeszcze niedawno toczyły krwawą wojnę. Jak na ironię, późniejsze analizy fotografii wykonanych w trakcie tych obserwacji wykazały, że błędy doświadczalne były porównywalne z samym efektem, który miał zostać zmierzony. Wynik pomiarów stanowił rezultat szczęśliwego przypadku, a być może rezultat z góry założonej tezy, co nie stanowiłoby

odosobnionego przypadku w nauce. Ugięcie światła zostało jednak później potwierdzone przez wiele dokładniejszych obserwacji.

Kolejny wniosek z ogólnej teorii względności mówi, że czas powinien biec wolniej w pobliżu masywnego ciała, na przykład Ziemi. Einstein po raz pierwszy uświadomił to sobie w 1907 roku, pięć lat przed tym, zanim zdał sobie sprawę z wpływu grawitacji na zakrzywienie przestrzeni, i osiem lat przed ostatecznym sformułowaniem ogólnej teorii. Wyprowadził ten wniosek z zasady równoważności, która w ogólnej teorii względności odgrywa podobną rolę do tej, jaką zasada względności odgrywa w szczególnej teorii względności.

Przypomnijmy, że zasada względności, czyli podstawowy postulat szczególnej teorii względności, stwierdza, iż prawa fizyki powinny być takie same dla wszystkich swobodnie poruszających się obserwatorów niezależnie od prędkości, z jakimi się poruszają. Zasada równoważności rozszerza ten postulat także na tych obserwatorów, którzy nie poruszają się swobodnie, lecz znajdują się w polu grawitacyjnym. Ściśle rzecz biorąc, precyzyjne sformułowanie zasady równoważności musi uwzględniać pewne techniczne zawilości, na przykład fakt, że w przypadku niejednorodnego pola grawitacyjnego zasadę należy stosować oddzielnie dla szeregu małych, nakładających się obszarów, lecz nie musimy się zagłębiać w takie szczegóły. Dla naszych celów wystarczy następujące sformułowanie zasady równoważności: w dostatecznie małych obszarach czasoprzestrzeni nie można odróżnić, czy znajdujemy się w spoczynku w polu grawitacyjnym czy przyspieszamy jednorodnie w pustej przestrzeni.

Wyobraźmy sobie, że jesteśmy zamknięci w kabinie windy, która znajduje się w pustej przestrzeni. Nie ma grawitacji, nie ma żadnej „góry” ani „dołu”. Unosimy się swobodnie. Lecz gdy nagle winda zacznie się poruszać z jednostajnym przyspieszeniem, odczujemy swoją wagę, to znaczy poczujemy przyciąganie w kierunku jednej ze ścian windy, która w ten sposób stanie się podłogą! Gdy teraz upuścimy jabłko, spadnie ono na podłogę. W istocie przez cały czas, gdy winda przyspiesza, wszystko, co dzieje się wewnątrz niej, będzie się odbywać tak, jakby winda w ogóle się nie poruszała, lecz znajdowała się w spoczynku w jednorodnym polu grawitacyjnym. Einstein uświadomił sobie, że — podobnie jak z wnętrza wagonu nie można stwierdzić, czy pociąg porusza się jednostajnie — z wnętrza windy nie można stwierdzić, czy winda jednostajnie przyspiesza czy znajduje się w jednorodnym polu grawitacyjnym. W ten sposób Einstein doszedł do swojej zasady równoważności.

Zasada równoważności — a także powyższy przykład jej zastosowania — jest prawdziwa tylko pod warunkiem, że masa inercjalna (masa z dru-

giego prawa Newtona, które określa przyspieszenie, z jakim ciało się porusza pod wpływem siły) jest tożsama z masą grawitacyjną (masą z prawa grawitacji Newtona, które określa wielkość siły grawitacji — zob. rozdział 4). Jeżeli dla każdego ciała te dwie masy są równe, to wszystkie ciała znajdujące się w polu grawitacyjnym będą spadać w takim samym tempie niezależnie od swej masy. Gdyby ta równoważność nie była prawdziwa, pod wpływem grawitacji niektóre ciała spadałyby szybciej, co oznacza, że można by odróżnić skutki działania grawitacji od działania jednostajnego przyspieszenia, kiedy to wszystko spada w takim samym tempie. Wykorzystanie przez Einsteina równoważności masy inercjalnej i grawitacyjnej do wyprowadzenia zasady równoważności, a następnie całej ogólnej teorii względności, jest przykładem nieugiętej konsekwencji w logicznym rozumowaniu, które nie ma sobie równych w historii ludzkiej myśli.

Teraz, gdy znamy już zasadę równoważności, możemy przeanalizować kolejny myślowy eksperyment Einsteina, który dowodzi, że grawitacja musi wywierać wpływ na czas. Wyobraźmy sobie raketę unoszącą się w przestrzeni kosmicznej. Dla ułatwienia założmy, że jest na tyle długa, iż promień światła potrzebuje jednej sekundy, aby pokonać odległość od dziobu do rufy. Na koniec założmy, że na obu końcach rakiety znajdują się dwaj obserwatorzy wyposażeni w identyczne zegary, które tykają co sekundę.

Przypuśćmy, że obserwator na dziobie wysyła w kierunku rufy sygnał świetlny dokładnie w tym momencie, gdy jego zegar tyka, a następnie po upływie pełnej sekundy — gdy zegar ponownie tyka — wysyła kolejny sygnał. Każdy z tych dwóch sygnałów biegnie wzdłuż rakiety i po upływie sekundy jest odbierany przez obserwatora na rufie. W rezultacie mamy do czynienia z sytuacją, w której obserwator na dziobie wysyła dwa sygnały w odstępie jednej sekundy, a obserwator na rufie odbiera dwa sygnały w odstępie jednej sekundy.

Czy sytuacja uległaby zmianie, gdyby raketa spoczywała na Ziemi w zasięgu grawitacji, zamiast unosić się swobodnie w przestrzeni? Według teorii Newtona grawitacja nie ma wpływu na odstęp czasu między dwoma sygnałami. Jeżeli obserwator na dziobie wysyła dwa sygnały w odstępie jednej sekundy, to obserwator na rufie odbiera dwa sygnały w odstępie jednej sekundy. Lecz zasada równoważności przewiduje coś innego. Możemy się o tym przekonać, jeżeli zamiast grawitacji rozważymy efekt jednostajnego przyspieszenia. W podobny sposób Einstein zastosował zasadę równoważności do stworzenia swojej nowej teorii grawitacji.

Przypuśćmy zatem, że raketa przyspiesza (założmy jednak, że przyspieszenie jest niewielkie, dzięki czemu w trakcie naszych eksperymentów raketa nie osiągnie prędkości bliskiej prędkości światła!). Raketa porusza

się do przodu, więc pierwszy sygnał będzie miał do pokonania nieco mniejszą odległość niż uprzednio, a zatem zajmie mu to nieco mniej niż jedną sekundę. Gdyby rakieta poruszała się z jednostajną prędkością, drugiemu sygnałowi podróż na rufę zajęłaby dokładnie tyle samo czasu co pierwszemu, a zatem oba sygnały dotarłyby do celu w odstępie jednej sekundy, podobnie jak uprzednio. Jeżeli jednak rakieta przyspiesza, to w momencie wysyłania drugiego sygnału będzie się poruszała nieco szybciej niż w momencie wysyłania pierwszego sygnału, więc drugi sygnał będzie miał do pokonania jeszcze mniejszą odległość niż pierwszy, a zatem podróż zajmie mu jeszcze mniej czasu. Jeżeli obserwator na dziobie także i tym razem wyśle oba sygnały w odstępie jednej sekundy, obserwator na rufie odbierze je w odstępie czasu krótszym niż jedna sekunda.

W przypadku przyspieszającej rakiety zapewne nie jest to zaskakujące, zwłaszcza że właśnie wyjaśniliśmy, dlaczego odstępy czasu zmierzone przez obu obserwatorów muszą się różnić. Lecz zasada równoważności mówi, że tak samo będzie w rakiecie spoczywającej w polu grawitacyjnym. Oznacza to, że nawet wtedy, gdy rakieta nie porusza się, lecz stoi (w pozycji pionowej) na pasie startowym na powierzchni Ziemi, zmierzone czasy będą różne. Jeżeli obserwator na dziobie wyśle w kierunku rufy dwa sygnały w odstępie jednej sekundy (według wskazań jego zegara), obserwator na rufie odbierze te sygnały w krótszym odstępie czasu (według wskazań jego zegara). To j e s t zaskakujące!

Można zadać pytanie, czy oznacza to, że grawitacja zmienia czas czy tylko psuje zegary. Przypuśćmy, że obserwator z rufy przejdzie na dziób rakiety, żeby porównać sekundę odmierzoną przez swój zegar z sekundą na zegarze swojego partnera. Są to identyczne zegary, więc okaże się oczywiście, że ich wskazania są identyczne. Zegar obserwatora z rufy nie jest w żaden sposób uszkodzony — po prostu mierzy lokalny upływ czasu, gdziekolwiek się znajduje. Podobnie jak szczególna teoria względności mówi nam, że czas biegnie inaczej dla obserwatorów poruszających się względem siebie, ogólna teoria względności mówi, że czas biegnie inaczej dla obserwatorów znajdujących się na różnych wysokościach w polu grawitacyjnym. Zgodnie z ogólną teorią względności obserwator na rufie zmierzy krótszy odstęp czasu między dwoma sygnałami, ponieważ znajduje się bliżej Ziemi, gdzie czas upływa wolniej. Im silniejsze pole, tym wyraźniejszy efekt. Prawa ruchu Newtona położyły kres idei absolutnego położenia w przestrzeni, a teraz zobaczyliśmy, w jaki sposób teoria względności wyeliminowała koncepcję absolutnego czasu.

Przewidywania te zostały przetestowane w 1962 roku przy użyciu pary bardzo dokładnych zegarów umieszczonych na szczycie oraz u podstawy

wieży ciśnień. Okazało się, że zegar położony bliżej Ziemi idzie wolniej, dokładnie tak jak przewiduje ogólna teoria względności. Efekt jest na tyle słaby, że wskazania zegara znajdującego się na powierzchni Słońca różniłyby się jedynie o mniej więcej jedną minutę na rok w porównaniu z zegarem na powierzchni Ziemi, lecz w epoce bardzo dokładnych systemów nawigacyjnych, opartych na sygnałach wysyłanych przez satelity, różnice wskazań zegarów znajdujących się na różnych wysokościach nad Ziemią mają bardzo poważne praktyczne konsekwencje. Gdyby zignorować przewidywania ogólnej teorii względności, współrzędne geograficzne wskazywane przez systemy nawigacji satelitarnej byłyby obarczone błędem sięgającym wielu kilometrów!

Owe zmiany tempa upływu czasu dotyczą także naszych biologicznych zegarów. Rozważmy parę bliźniaków, z których jeden żyje na szczycie góry, a drugi na poziomie morza. Górski bliźniak starzeje się szybciej niż jego nizinny odpowiednik, więc gdy się w końcu spotkają, będzie nieco starszy. W tym konkretnym przypadku różnica wieku będzie bardzo mała, lecz byłaby znacznie większa, gdyby jeden z bliźniaków wybrał się w długą podróż statkiem kosmicznym rozpędzonym do prędkości bliskiej prędkości światła. Po powrocie podróżnik będzie znacznie młodszy od swego mniej ruchliwego brata. Jest to tak zwany paradoks bliźniąt, lecz stanowi prawdziwy paradoks tylko dla kogoś przywiązanego do koncepcji absolutnego czasu. W teorii względności nie istnieje absolutny czas; każdy obiekt ma własną miarę czasu, która zależy od tego, gdzie się znajduje i w jaki sposób się porusza.

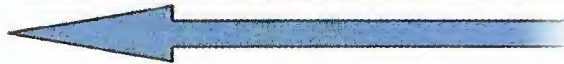
Przed rokiem 1915 przestrzeń i czas były uważane za nieruchomą arenę, w której zachodzą zdarzenia, lecz nie wywierają na nią wpływu. Tak było nawet w szczególnej teorii względności. Ciała się poruszały, siły przyciągały i odpychały, lecz czas i przestrzeń pozostawały niezmiennie i naturalne wydawało się założenie, że trwały wiecznie. W ogólnej teorii względności sytuacja jest jednak całkiem odmienna. Czas i przestrzeń stanowią teraz dynamiczne wielkości: gdy ciało się porusza lub gdy działa siła, zmienia się zakrzywienie czasu i przestrzeni, a struktura czasoprzestrzeni wpływa z kolei na sposób, w jaki ciała się poruszają i siły działają. Przestrzeń i czas nie tylko wywierają wpływ, lecz także zmieniają się pod wpływem wszystkiego, co dzieje się we wszechświecie. Podobnie jak nie można rozważać zjawisk zachodzących we wszechświecie, nie uwzględniając pojęć przestrzeni i czasu, w ogólnej teorii względności nie ma sensu rozważanie przestrzeni i czasu poza granicami wszechświata. Po roku 1915 to nowe rozumienie przestrzeni i czasu zrewolucjonizowało nasze poglądy na wszechświat. Jak zobaczymy, dawna idea zasadniczo niezmiennego wszechświata, który

mógł istnieć wiecznie i który będzie istniał wiecznie, została zastąpiona przez koncepcję dynamicznego, rozszerzającego się wszechświata, który zaczął się w pewnym określonym momencie w przeszłości i który może się skończyć w pewnym określonym momencie w przyszłości.

ROZSZERZAJĄCY SIĘ WSZECHŚWIAT

PLANETY WENUS, MARS, JOWISZ I SATURN stanowią najjaśniejsze obiekty, jakie można zobaczyć na niebie w czasie bezchmurnej i bezksiężycowej nocy. Widoczna jest również olbrzymia liczba gwiazd, które od Słońca różnią się tylko tym, że znajdują się znacznie dalej od nas. Nazywamy je gwiazdami stałymi, lecz niektóre z nich w rzeczywistości wcale nie są „stałe”, ponieważ te z nich, które znajdują się względnie blisko nas, zmieniają nieco swoje położenie względem innych gwiazd. W wyniku ruchu Ziemi wokół Słońca bliżej położone gwiazdy widzimy w nieco innych położeniach na tle bardziej odległych gwiazd. Jest to taki sam efekt, jak wtedy, gdy jedziemy wzdłuż wysadzonej drzewami drogi. Względne położenia przydrożnych drzew wydają się zmieniać na tle obiektów znajdujących się na horyzoncie. Im bliżej drogi rośnie dane drzewo, tym szybciej wydaje się poruszać na tle horyzontu. Taka zmiana względnego położenia nosi nazwę paralaksy (zob. ilustrację na stronie 51). W przypadku gwiazd umożliwia ona bezpośredni pomiar ich odległości.

Jak wspomnieliśmy w rozdziale 1, najbliższa gwiazda, Proxima Centauri, znajduje się w odległości około czterech lat świetlnych, czyli około czterdziestu milionów kilometrów. Większość gwiazd, które są widoczne z Ziemi gołym okiem, znajduje się w odległości nie większej niż kilkaset lat świetlnych od nas. Dla porównania, Słońce jest oddalone od Ziemi zaledwie o osiem minut świetlnych! Gwiazdy są obecne na całym firmamencie, lecz duża ich część tworzy wyraźnie widoczne pasmo, które nazywamy Drogą Mleczną. W połowie osiemnastego wieku niektórzy astronomowie sądzili, że większość widocznych gwiazd tworzy podobną do dysku konfigurację (którą obecnie nazywamy galaktyką spiralną), co tłumaczyłoby wygląd Drogi Mlecznej. Kilkadziesiąt lat później astronom sir William Herschel potwierdził tę ideę, pracując katalogując pozycje i odległości olbrzymiej liczby gwiazd, lecz dopiero w dwudziestym wieku została ona powszechnie zaakceptowana. Obecnie wiemy, że Droga



Paralaksa

Gdy jedziemy wzdłuż drogi lub poruszamy się w przestrzeni, położenia bliższych obiektów względem dalszych ulegają zmianom, które mogą zostać użyte do zmierzenia ich względnych odległości.

Mleczna — nasza Galaktyka — ma średnicę kilkuset tysięcy lat świetlnych. Galaktyka obraca się powoli wokół swej osi, a gwiazdy znajdujące się w jej spiralnych ramionach okrążają centrum raz na kilkaset milionów lat. Nasze Słońce jest zwykłą, żółtą gwiazdą o przeciętnych rozmiarach, usytuowaną w pobliżu wewnętrznej krawędzi jednego ze spiralnych ramion. Przeszliśmy długą drogę od czasów Arystotelesa i Ptolemeusza, którzy uważali, że Ziemia stanowi środek wszechświata!

Nasz współczesny obraz wszechświata zrodził się w 1924 roku, gdy amerykański astronom Edwin Hubble odkrył wiele innych galaktyk rozdzielonych przez olbrzymie obszary pustej przestrzeni, dzięki czemu wykazał, że Droga Mleczna nie jest jedyną galaktyką. Aby tego dokonać, musiał zmierzyć odległości od Ziemi do innych galaktyk. Odległości te są jednak tak duże, że położenia galaktyk na niebie naprawdę wydają się niezmiennicze, więc Hubble nie mógł zastosować metody paralaksy i musiał użyć innych, pośrednich metod. Jednym z oczywistych sposobów pomiaru odległości gwiazdy jest jej jasność. Pozorna (obserwowana) jasność gwiazdy zależy nie tylko od jej odległości, lecz także od ilości emitowanego przez nią światła (jasności absolutnej). Słabo świecąca, lecz blisko położona gwiazda przyćmi nawet najjaśniejszą gwiazdę z odległej galaktyki. Aby użyć obserwowanej jasności jako miary odległości gwiazd, musimy znać ich jasności absolutne. Dla gwiazd znajdujących się w niewielkich odległościach od Ziemi możemy wyznaczyć jasności absolutne, obserwując ich jasności pozorne oraz mierząc — metodą paralaksy — ich odległości. Hubble zauważył, że te pobliskie gwiazdy można podzielić na kilka typów na podstawie emitowanego przez nie światła. Gwiazdy tego samego typu mają taką samą jasność absolutną. Następnie założył, że jeżeli znajdziemy gwiazdę jakiegoś określonego typu w odległej galaktyce, to jej jasność absolutna będzie taka sama jak jasność absolutna innych gwiazd tego samego typu. Możemy wtedy wyznaczyć odległość tej galaktyki, mierząc jasności jej gwiazd. Jeżeli wykonane taką metodą obliczenia odległości dla kilku różnych gwiazd należących do pewnej galaktyki dadzą taki sam wynik, to możemy uznać, że metoda jest dość wiarygodna. W ten sposób Hubble zmierzył odległości dziewięciu różnych galaktyk.

Obecnie wiemy, że widoczne gołym okiem gwiazdy stanowią znikomy ułamek wszystkich gwiazd. Widzimy około pięciu tysięcy gwiazd, co stanowi zaledwie 0,0001 procenta wszystkich gwiazd naszej Galaktyki. Droga Mleczna jest tylko jedną z ponad stu miliardów galaktyk, które można dostrzec za pomocą współczesnych teleskopów, a każda z nich zawiera średnio około stu miliardów gwiazd. Gdyby gwiazda była grudką soli, wszystkie widoczne gołym okiem gwiazdy zmieściłyby się na łyżeczce do

herbaty, lecz wszystkie gwiazdy we wszechświecie zapełniłyby kulę o średnicy około trzynastu kilometrów.

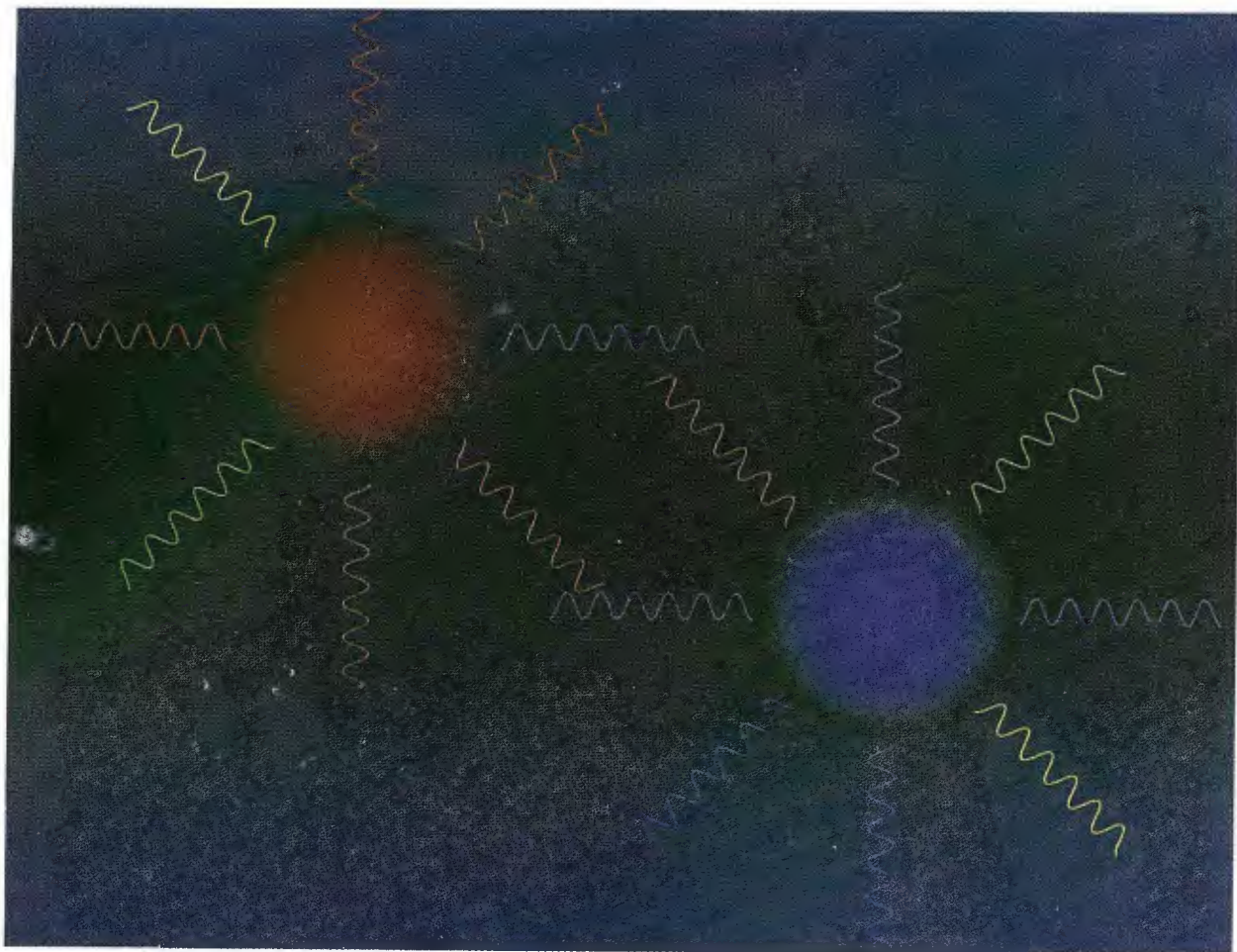
Gwiazdy są tak daleko, że postrzegamy je jako punkty światła. Nie widzimy ich rozmiarów ani kształtów. Lecz jak zauważył Hubble, istnieje wiele typów gwiazd, które możemy rozróżnić na podstawie koloru emitowanego przez nie światła. Newton odkrył, że promień światła słonecznego przepuszczony przez trójkątny kawałek szkła zwany pryzmatem rozszczepia się na wiązkę różnokolorowych promieni przypominającą tęczę. Względne natężenia różnych kolorów światła emitowanego przez dowolne źródło nazywamy widmem. Współczesne teleskopy umożliwiają obserwacje widma pojedynczych gwiazd lub całych galaktyk.

Światło emitowane przez gwiazdy zawiera także informację o temperaturze. W 1860 roku niemiecki fizyk Gustav Kirchhoff odkrył, że każde



Widmo gwiazdy

Analizując rozkład kolorów światła gwiazdy, można określić zarówno jej temperaturę, jak i skład jej atmosfery.



Widmo promieniowania ciała czarnego

Każde ciało — nie tylko gwiazdy — emituje promieniowanie, które wynika z termicznych ruchów jego mikroskopowych elementów. Rozkład częstotliwości tego promieniowania wynika z temperatury ciała.

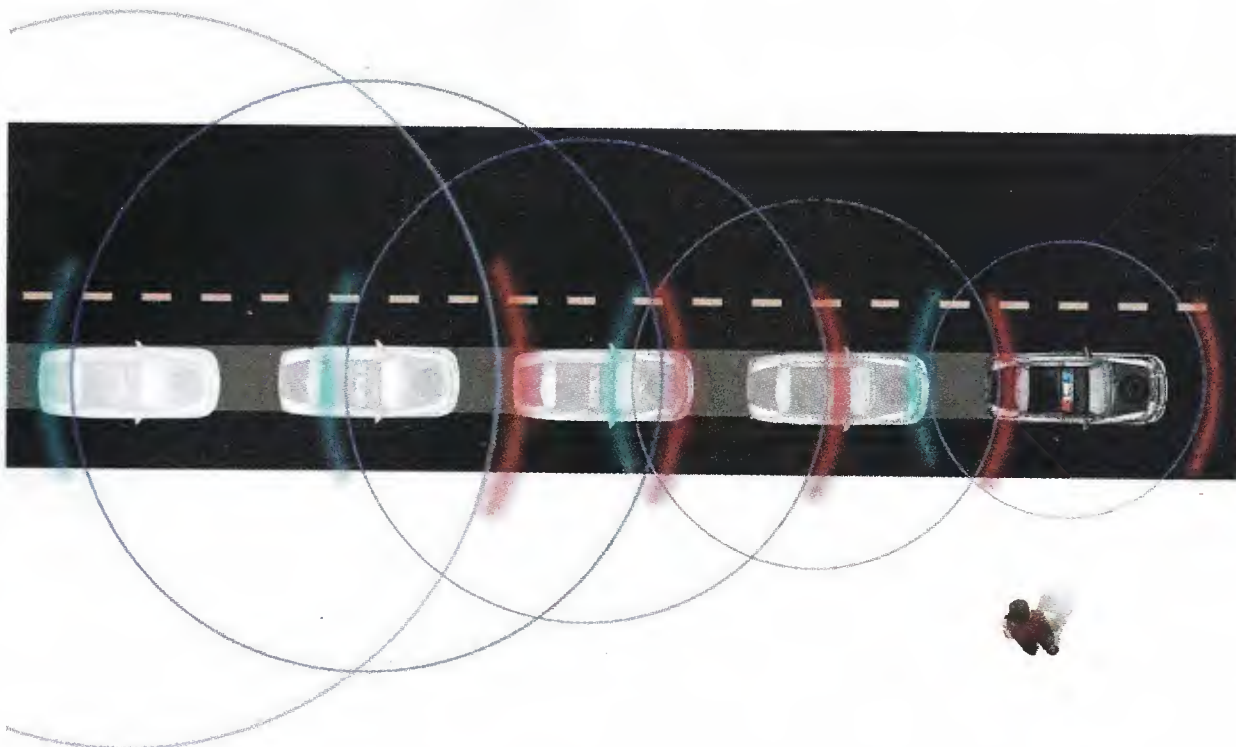
rozgrzane ciało emituje światło lub inny rodzaj promieniowania. Gwiazdy świecą na podobnej zasadzie jak węgiel w kominku — na skutek termicznych ruchów atomów, z których są zbudowane. Jest to tak zwane promieniowanie ciała doskonale czarnego (mimo że świecące obiekty nie są na ogół czarne). Widmo promieniowania ciała doskonale czarnego jest bardzo łatwe do zidentyfikowania dzięki swemu charakterystycznemu kształtowi, który zmienia się wraz z temperaturą. Światło emitowane przez rozgrzane ciało w pewnym sensie stanowi gotowy odczyt termometru. Obserwowane widma różnych gwiazd mają zawsze taki sam kształt i odzwierciedlają termiczny stan gwiazdy.

Jeżeli przyjrzymy się jeszcze dokładniej, światło gwiazd dostarczy jeszcze więcej informacji. W widmach różnych gwiazd brakuje niektórych kolorów. Każdy pierwiastek chemiczny absorbuje charakterystyczny, określony

zestaw kolorów. Identyfikując kolory brakujące w widmie danej gwiazdy, możemy bardzo precyzyjnie stwierdzić, które pierwiastki są obecne w atmosferze gwiazdy. W latach dwudziestych dwudziestego wieku, gdy astronomowie zaczęli analizować światło gwiazd z innych galaktyk, odkryli coś bardzo dziwnego: układy brakujących kolorów w widmach tych gwiazd były takie same jak dla gwiazd z naszej Galaktyki, lecz wszystkie były przesunięte w kierunku czerwonego końca widma, a względne przesunięcia były takie same dla wszystkich kolorów danej gwiazdy.

Zmiana koloru — czyli częstotliwości fali — jest w fizyce znana jako efekt Dopplera. Wszyscy dobrze znamy ten efekt w domenie dźwiękowej. Gdy słyszymy przejeżdżające auto, dźwięk jego silnika (lub syreny w przypadku karetki pogotowia) jest wyższy, gdy auto zbliża się do nas, natomiast gdy nas minie, dźwięk staje się niższy. Dźwięk silnika lub syreny jest falą. Wyobraźmy sobie tę falę jako szereg nadbiegających grzbietów oraz przedzielających grzbiety dolin. Gdy auto zbliża się do nas, wysyła kolejne grzbiety, sukcesywnie zmniejszając dzielącą je odległość. Zatem długość fali — czyli odległość sąsiednich grzbietów — jest mniejsza niż wtedy, gdy auto się nie porusza. Im mniejsza długość fali, tym więcej grzbietów dociera do naszego ucha w każdej sekundzie, co przekłada się na odpowiednio większą częstotliwość dźwięku, czyli wyższy ton. Gdy auto się oddala, długość fali będzie odpowiednio większa, a zatem dotrze do nas dźwięk o niższej częstotliwości. Im szybciej porusza się źródło dźwięku, tym większy efekt Dopplera, a zatem możemy go wykorzystać do pomiaru prędkości. Podobnie zachowuje się światło lub fale radiowe. Policjanci wykorzystują efekt Dopplera, posyłając impulsy fal radiowych w kierunku przejeżdżających samochodów, a następnie mierząc prędkość samochodu na podstawie pomiaru długości fali odbijającej się od poruszającego się pojazdu i powracającej do nadajnika.

Jak wspomnieliśmy w rozdziale 5, długość fali widzialnego światła jest niezwykle mała. Mieści się w zakresie od czterdziestu do osiemdziesięciu milionowych części centymetra. Ludzkie oko postrzega różne długości fali z tego zakresu jako różne kolory. Największa długość fali odpowiada czerwieni, najmniejsza fioletowi. Wyobraźmy sobie teraz źródło światła w pewnej odległości od nas, na przykład gwiazdę emitującą światło o określonej długości fali. Długość fali, jaką zaobserwujemy, będzie taka sama jak długość fali, jaką źródło emituje. Załóżmy jednak, że źródło oddala się od nas. Podobnie jak w przypadku dźwięku oddalającego się samochodu, docierające do nas światło będzie miało większą długość fali, a zatem jego widmo będzie przesunięte w kierunku czerwonego końca.



Efekt Dopplera

Obserwator rejestruje różne długości fal w zależności od ruchu źródła. Gdy źródło fal porusza się w kierunku obserwatora, fale wydają się krótsze. Gdy źródło się oddala, fale wydają się dłuższe.

W ciągu kilku następnych lat po odkryciu istnienia innych galaktyk Hubble obserwował ich widma i katalogował ich odległości. Podobnie jak inni astronomowie przewidywał, że galaktyki poruszają się w różnych przypadkowych kierunkach, więc spodziewał się mniej więcej takiej samej liczby galaktyk z widmem przesuniętym ku czerwieni, jak z przesunięciem ku fioletowi. Odkrycie, że większość galaktyk przejawia przesunięcie ku czerwieni, stanowiło zatem nie lada niespodziankę — niemal wszystkie galaktyki oddalają się od nas! Jeszcze bardziej zaskakujące było odkrycie, które Hubble opublikował w 1929 roku: nawet rozmiary przesunięcia ku czerwieni nie są przypadkowe, lecz proporcjonalne do odległości danej galaktyki od nas. Innymi słowy, im dalej od nas dana galaktyka się znajduje, tym szybciej się oddala! A to oznacza, że wszechświat nie może być statyczny i niezmienny, jak wszyscy uprzednio sądzili. Wszechświat się rozszerza. Odległości między różnymi galaktykami cały czas się powiększają.

Odkrycie, że wszechświat się rozszerza, stanowiło jedną z wielkich intelektualnych rewolucji dwudziestego stulecia. Z obecnej perspektywy wy-

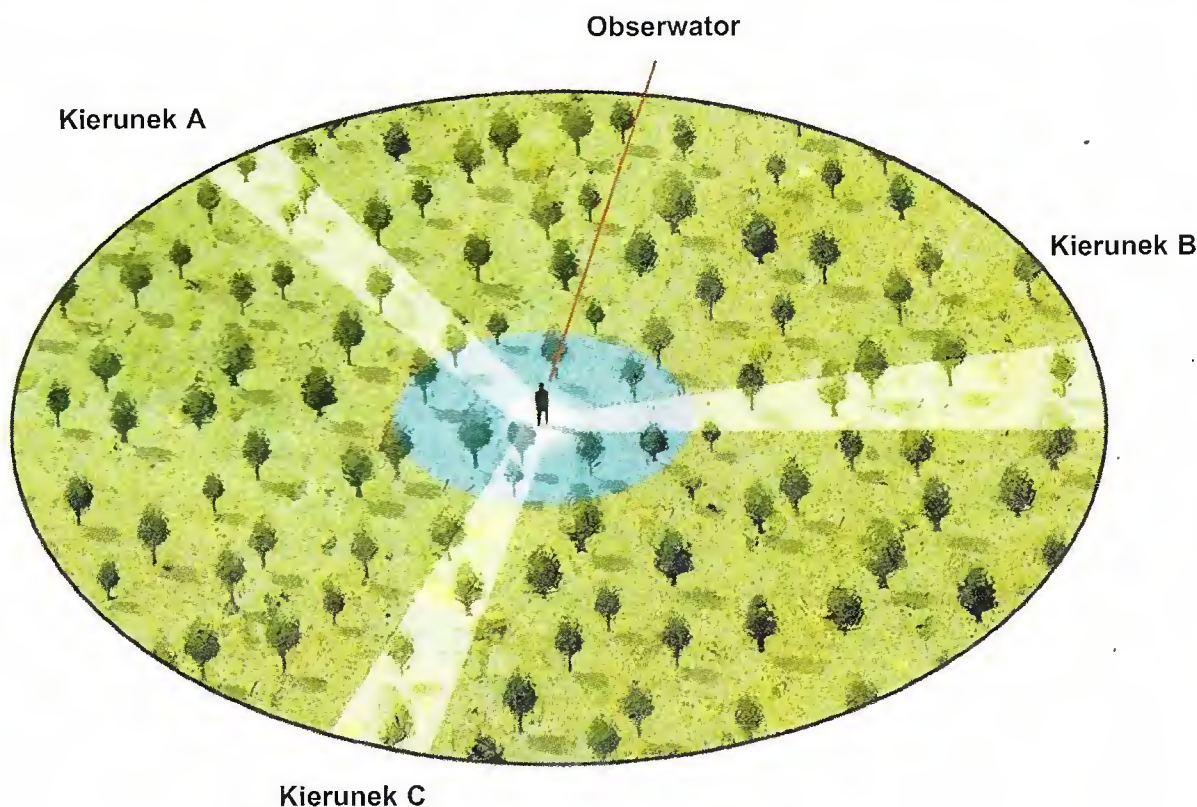
daje się zadziwiająco, dlaczego nikt nie pomyślał o tym wcześniej. Newton i inni uczeni powinni zdawać sobie sprawę, że statyczny wszechświat byłby niestabilny, ponieważ nie istniałaby w nim siła odpychająca, która zrównoważyłaby grawitacyjne przyciąganie, z jakim wszystkie gwiazdy i galaktyki oddziałują wzajemnie na siebie. Nawet gdyby w pewnym momencie był statyczny, nie mógłby zawsze pozostać statyczny, ponieważ grawitacyjne przyciąganie gwiazd i galaktyk spowodowałoby stopniową kontrakcję. Nawet gdyby wszechświat rozszerzał się z pewną niewielką prędkością, siła grawitacji zahamowałaby ekspansję, a następnie zainicjowałaby kontrakcję. Gdyby jednak wszechświat rozszerzał się z pewną dostatecznie dużą prędkością, grawitacja nigdy nie zdołałaby go powstrzymać i ekspansja trwałaby wiecznie. To trochę przypomina wystrzeliwanie rakiety z powierzchni Ziemi. Jeżeli rakietę startuje z pewną niezbyt dużą prędkością, grawitacja w końcu ją zatrzyma i zmusi do spadania z powrotem w kierunku Ziemi. Jeżeli jednak rakietę startuje z prędkością większą od tak zwanej prędkości granicznej (około jedenastu kilometrów na sekundę), grawitacja nie będzie dostatecznie silna, żeby powstrzymać raketę przed nieustannym oddalaniem się od Ziemi.

Takie zachowanie wszechświata można było w wieku dziewiętnastym, osiemnastym, a nawet pod koniec wieku siedemnastego wywnioskować z teorii grawitacji Newtona. Wiara w statyczny wszechświat była jednak tak silna, że przetrwała do początków dwudziestego wieku. Nawet Einstein, gdy w 1915 roku sformułował równania ogólnej teorii względności, był do tego stopnia przekonany, że wszechświat jest statyczny, iż zmodyfikował teorię w taki sposób, aby to uwzględnić. Wprowadził do swoich równań dodatkowy czynnik, zwany stałą kosmologiczną, który grał rolę dodatkowej siły — antygravitacji — nie pochodzącej z żadnego określonego źródła, lecz wbudowanej w strukturę czasoprzestrzeni. W wyniku działania tej nowej siły czasoprzestrzeń miałaby samoistną tendencję do nieustannej ekspansji. Zmieniając wartość stałej kosmologicznej, Einstein mógł regulować tempo tego rozszerzania, dzięki czemu stwierdził, że może dokładnie zrównoważyć grawitacyjne przyciąganie materii, którą zawiera wszechświat. W ten sposób teoria Einsteina mogła opisywać statyczny wszechświat. Einstein porzucił później koncepcję stałej kosmologicznej, nazywając ją swoją „największą pomyłką”. Jak zobaczymy w dalszej części rozdziału, mamy obecnie powody sądzić, że być może miał jednak rację, gdy ją wprowadził, lecz przyczyną owej samokrytyki Einsteina było w istocie to, że jego wiara w statyczny wszechświat przeważała nad wnioskami wypływającymi z jego własnej teorii, która przewidywała rozszerzający się wszechświat. Wydaje się, że tylko jeden uczony był skłonny potraktować

poważnie owe konsekwencje. Podczas gdy Einstein oraz inni fizycy próbowali pogodzić statyczny wszechświat z ogólną teorią względności, rosyjski fizyk i matematyk, Aleksander Friedmann, wyjaśnił, w jaki sposób niestacyjny wszechświat wynika z ogólnej teorii względności.

Friedmann zaczął od dwóch bardzo prostych założeń na temat wszechświata: że wygląda tak samo niezależnie od tego, w którym kierunku spojrzymy, i że tak samo wyglądałby, gdybyśmy obserwowali go z dowolnego miejsca. Wychodząc z tych dwóch założeń, Friedmann rozwiązał równania ogólnej teorii względności i pokazał, że nie powinniśmy oczekiwać statycznego wszechświata. W 1922 roku, siedem lat przed odkryciem Hubble'a, Friedmann przewidział dokładnie to, co Hubble później odkrył!

Założenie, że wszechświat wygląda tak samo w każdym kierunku, nie jest oczywiście w pełni prawdziwe. Na przykład, jak stwierdziliśmy powyżej, gwiazdy Galaktyki tworzą wyraźnie widoczne pasmo światła na nocnym niebie, zwane Drogą Mleczną. Gdy jednak patrzymy na odległe galaktyki, wydaje się, że w każdym kierunku jest ich mniej więcej tyle samo. Wszechświat faktycznie jest taki sam w każdym kierunku, pod warun-



Izotropowy las

Nawet gdy drzewa w lesie rosną jednorodnie, najbliższa okolica może wydawać się gęstsza. Na podobnej zasadzie wszechświat nie wygląda jednorodnie w naszym najbliższym sąsiedztwie, lecz w dużej skali wydaje się identyczny w dowolnie wybranym kierunku.

kciem że uwzględniamy skalę odległości znacznie większą od odległości galaktyk i ignorujemy różnice w małych skalach. Wyobraźmy sobie dziewiczy las, w którym drzewa rosną w przypadkowo wybranych miejscach. Jeżeli spojrzemy w jakimś określonym kierunku, możemy zobaczyć drzewo w odległości jednego metra. W innym kierunku najbliższe drzewo może się znajdować w odległości trzech metrów. W trzecim kierunku rośnie cała kępa drzew w odległości dwóch metrów od nas. W tej skali las nie wygląda tak samo w każdym kierunku. Lecz gdybyśmy wzięli pod uwagę wszystkie drzewa w promieniu kilometra, takie różnice uległyby uśrednieniu i okazałoby się, że las faktycznie jest taki sam niezależnie od kierunku, w którym spoglądamy.

Jednorodny rozkład gwiazd — jako przybliżony obraz wszechświata w dużej skali — bardzo długo stanowił jedyne, lecz wystarczające uzasadnienie założenia Friedmanna. Pewne przypadkowe odkrycie ujawniło, że także pod całkiem innym względem założenie Friedmanna stanowi zadziwiająco dokładny opis wszechświata. W 1965 roku dwaj amerykańscy fizycy z Bell Telephone Laboratories w stanie New Jersey, Arno Penzias i Robert Wilson, testowali bardzo czuły detektor promieniowania mikrofalowego (przypomnijmy, że mikrofałe to także fale elektromagnetyczne, podobnie jak światło, lecz o długości fali równej około centymetra). Penzias i Wilson starali się zlokalizować i usunąć źródło szumu, który zakłócał pracę ich detektora. Odkryli i usunęli ptasie odchody z anteny, zbadali inne możliwe przyczyny wadliwego działania detektora, lecz w końcu wykluczyli wszystkie możliwe do pomyślenia lokalne źródła. Szum był dość szczególny w tym sensie, że pozostawał niezmienny niezależnie od pory dnia i nocy, a nawet pory roku, mimo że Ziemia wiruje wokół swej osi i krąży wokół Słońca, dzięki czemu detektor był skierowany w różnych kierunkach w różnych porach dnia i w różnych porach roku. Penzias i Wilson doszli do wniosku, że szum pochodzi spoza Układu Słonecznego, a nawet spoza Galaktyki. Wydawało się, że pochodzi w jednakowym stopniu z każdego kierunku w przestrzeni. Obecnie wiemy, że natężenie owego szumu w bardzo niewielkim stopniu zależy od kierunku, więc Penzias i Wilson przypadkowo natrafili na uderzający przykład pierwszego założenia Friedmanna — że wszechświat jest taki sam w każdym kierunku.

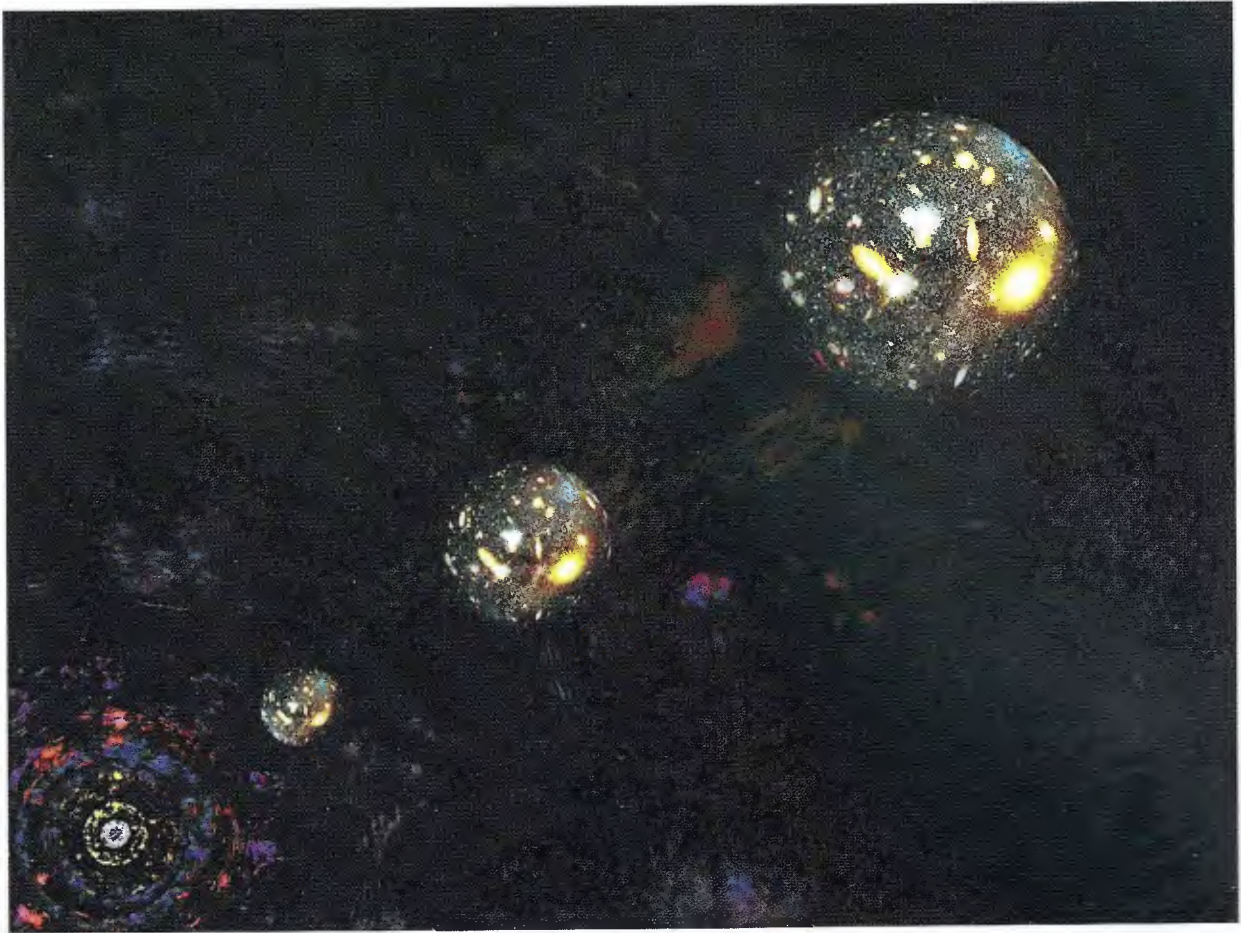
Jakie jest pochodzenie tego kosmicznego szumu? Mniej więcej w tym samym czasie, gdy Penzias i Wilson szukali źródeł szumu w swoim detektorze, dwaj inni amerykańscy fizycy w pobliskim Princeton University, Bob Dicke i Jim Peebles, również zainteresowali się mikrofalami. Kierując się sugestią George'a Gamowa (który w swoim czasie był studentem Aleksandra Friedmanna), że wczesny wszechświat powinien być bardzo

gęsty i gorący, a zatem powinien bardzo intensywnie promieniować, Dicke i Peebles doszli do wniosku, że powinniśmy nadal widzieć to promieniowanie, ponieważ obecnie dociera do nas światło od bardzo odległych części wszechświata. Lecz wszechświat się rozszerza, co oznacza, że promieniowanie to uległo tak znacznemu przesunięciu ku czerwieni, iż dotrze do nas w postaci promieniowania mikrofalowego, a nie światła widzialnego. Dicke i Peebles zamierzali poszukać tego promieniowania, lecz gdy Penzias i Wilson dowiedzieli się o ich pracach, uświadomili sobie, że właśnie je znaleźli. Za swe odkrycie otrzymali w 1978 roku Nagrodę Nobla (wydaje się, że była to nieco krzywdząca decyzja dla Dicke'a i Peeblesa, nie mówiąc już o Gamowie).

Wszystkie te dowody wskazujące, że wszechświat wygląda tak samo niezależnie od kierunku, w którym spoglądamy, mogą na pierwszy rzut oka sugerować, że nasze miejsce we wszechświecie jest w jakiś sposób wyróżnione. Rzeczywiście, skoro wszystkie galaktyki wydają się oddalać od nas, to może się nasuwać wniosek, że znajdujemy się w środku wszechświata. Istnieje jednak alternatywne wyjaśnienie — z każdej innej galaktyki wszechświat może wyglądać tak samo w każdym kierunku. To było, jak już wspomnieliśmy, drugie założenie Friedmanna.

Nie mamy naukowych dowodów ani za, ani przeciw temu drugiemu założeniu. Kilka wieków temu Kościół uważałby je za herezję, ponieważ było sprzeczne z doktryną, zgodnie z którą zajmujemy wyjątkowe miejsce w centrum wszechświata. Obecnie przyjmujemy założenie Friedmanna z niemal dokładnie odwrotnego powodu, pewnego rodzaju skromności: sądzimy, że byłoby zadziwiające, gdyby wszechświat wyglądał tak samo w każdym kierunku tylko wokół nas, a nie wokół innych punktów przestrzeni!

Zgodnie z modelem Friedmanna wszystkie galaktyki oddalają się od siebie nawzajem. Można je porównać do plamek namalowanych na powierzchni balonu, który jest jednostajnie pompowany. W miarę jak balon się rozszerza, odległość dowolnych dwóch plamek się powiększa, lecz o żadnej z nich nie można powiedzieć, że stanowi środek ekspansji. Co więcej, im bardziej oddalone są plamki, tym szybciej się oddalają. Załóżmy na przykład, że promień balonu podwaja się z każdą sekundą. Dwie plamki, które w pewnym momencie znajdowały się w odległości jednego centymetra (mierzonej wzdłuż powierzchni balonu), obecnie są oddalone o dwa centymetry, a zatem ich względna prędkość wynosi jeden centymetr na sekundę. Natomiast dwie inne plamki, które były oddalone o dziesięć centymetrów, obecnie są oddalone o dwadzieścia centymetrów, a zatem ich względna prędkość wynosi dziesięć centymetrów na sekundę. Na podob-



Rozszerzający się balon wszechświata

W wyniku rozszerzania się wszechświata wszystkie galaktyki oddalają się od siebie. W miarę upływu czasu bardziej oddalone galaktyki — podobnie jak plamki na nadmuchiwany balonie — zwiększają swoje wzajemne odległości w większym stopniu niż te, które są bliżej. Z punktu widzenia obserwatora położonego w dowolnie wybranym miejscu, im bardziej oddalona jest dana galaktyka, tym szybciej się oddala.

nej zasadzie w modelu Friedmanna wzajemna prędkość dwóch galaktyk jest proporcjonalna do ich odległości. Friedmann wywnioskował stąd, że przesunięcie ku czerwieni dla dowolnej galaktyki powinno być proporcjonalne do jej odległości od nas, dokładnie tak, jak to odkrył Hubble. Mimo sukcesu jego modelu oraz trafnych przewidywań obserwacji Hubble'a prace Friedmanna pozostawały w zasadzie nieznanymi na Zachodzie, dopóki podobne modele nie zostały odkryte w 1935 roku przez amerykańskiego fizyka Howarda Robertsona oraz brytyjskiego matematyka Arthura Walkera, których zainspirowało odkrycie przez Hubble'a jednorodnej ekspansji wszechświata.

Friedmann sformułował tylko jeden model wszechświata, lecz jeżeli jego założenia są słuszne, to w rzeczywistości istnieją trzy możliwe typy

rozwiązań równań Einsteina — trzy różne modele Friedmanna — określające trzy możliwe sposoby zachowania wszechświata.

W pierwszym rodzaju rozwiązań (który odkrył sam Friedmann) wszechświat rozszerza się na tyle powoli, że grawitacyjne przyciąganie galaktyk spowoduje stopniowe zwolnienie, a w końcu całkowite zatrzymanie ekspansji. Galaktyki zaczną się wtedy przybliżać i zacznie się kontrakcja wszechświata. W drugim rodzaju rozwiązań wszechświat rozszerza się tak raptownie, że grawitacyjne przyciąganie nigdy go nie zatrzyma, aczkolwiek także powoduje spowolnienie ekspansji. W trzecim typie rozwiązań wszechświat rozszerza się na tyle szybko, że uniknie kolapsu, lecz ani trochę szybciej. Prędkość ucieczki galaktyk staje się coraz mniejsza, lecz nigdy nie zmniejszy się dokładnie do zera.

Pierwszy rodzaj rozwiązań ma pewną zadziwiającą cechę, mianowicie wszechświat nie jest wprawdzie przestrzennie nieskończony, lecz zarazem przestrzeń nie ma granic. Pod wpływem grawitacji przestrzeń zostaje zakrzywiona w taki sposób, że tworzy trójwymiarowy odpowiednik sfery. Na podobnej zasadzie powierzchnia naszej planety jest wprawdzie przestrzennie skończona, lecz nie ma granic — jeżeli wyruszymy w podróż w określonym kierunku na powierzchni Ziemi, nigdy nie natkniemy się na nieprzekraczalną barierę ani nie spadniemy poza krawędź, lecz w końcu dotrzemy tam, skąd wyruszyliśmy. W modelu Friedmanna przestrzeń jest zakrzywiona w taki właśnie sposób, lecz w trzech wymiarach, a nie w dwóch. Koncepcja podróży wokół wszechświata i powrotu do punktu wyjścia stanowi doskonały pomysł dla literatury science fiction, lecz w praktyce nie da się jej zrealizować, ponieważ wszechświat zapadnie się do zerowych rozmiarów, zanim podróż zostanie ukończona. Można udowodnić, że ukończenie podróży i powrót do punktu wyjścia przed końcem wszechświata wymagałyby poruszania się z prędkością większą od prędkości światła, co nie jest dozwolone w teorii względności! W drugim modelu Friedmanna przestrzeń jest również zakrzywiona, aczkolwiek w inny sposób. Tylko trzeci model Friedmanna opisuje wszechświat, którego wielkoskalowa geometria jest płaska (aczkolwiek przestrzeń jest zakrzywiona w pobliżu masywnych obiektów).

Który model Friedmanna opisuje nasz wszechświat? Czy wszechświat w końcu przestanie się rozszerzać i zacznie się kurczyć, czy będzie się zawsze rozszerzał?

Okazuje się, że odpowiedź na to pytanie jest trudniejsza, niż początkowo się wydawało. Na najbardziej elementarnym poziomie zależy ona od dwóch czynników: obecnego tempa ekspansji wszechświata oraz jego obecnej średniej gęstości (czyli ilości materii przypadającej na jednostkę

objętości). Im większe tempo rozszerzania wszechświata, tym większa musiałaby być siła grawitacji niezbędna do jego zatrzymania. Im większa siła grawitacji, tym większa gęstość materii. Jeżeli średnia gęstość materii jest większa od pewnej krytycznej wartości (wynikającej z tempa ekspansji), grawitacyjne przyciąganie materii we wszechświecie zdoła powstrzymać ekspansję wszechświata i spowoduje jego kolaps, co odpowiada pierwszemu modelowi Friedmanna. Jeżeli średnia gęstość materii jest mniejsza od wartości krytycznej, grawitacyjne przyciąganie materii jest za słabe i nie zdoła powstrzymać ekspansji, więc wszechświat będzie się zawsze rozszerzał — co odpowiada drugiemu modelowi Friedmanna. Jeżeli średnia gęstość materii we wszechświecie jest dokładnie równa wartości krytycznej, wszechświat będzie spowalniał swoją ekspansję, stopniowo dochodząc do statycznych rozmiarów, lecz nigdy ich nie osiągnie. Odpowiada to trzeciemu modelowi Friedmanna.

A więc który z nich? Możemy wyznaczyć obecne tempo ekspansji, mierząc prędkości, z jakimi oddalają się od nas inne galaktyki. Wykorzystując efekt Dopplera, można uzyskać bardzo dokładne wyniki takich pomiarów. Odległości galaktyk są znane ze znacznie mniejszą dokładnością, ponieważ mierzymy je pośrednimi metodami. W rezultacie wiemy jedynie, że co miliard lat wszechświat powiększa się o 5 do 10 procent. Nasza znajomość obecnej gęstości wszechświata jest obarczona jeszcze większą niedokładnością, jeżeli jednak zsumujemy masy wszystkich gwiazd Galaktyki oraz innych galaktyk, dostaniemy mniej niż 1 procent gęstości niezbędnej do zatrzymania ekspansji wszechświata, nawet dla najniższego oszacowania tempa ekspansji.

To jednak nie wszystko. Nasza Galaktyka, a także wszystkie inne galaktyki muszą zawierać znaczne ilości tak zwanej ciemnej materii, której nie widzimy bezpośrednio, lecz wiemy o jej obecności na podstawie jej grawitacyjnego oddziaływania na orbity gwiazd. Najlepsze dowody pochodzą z obserwacji gwiazd na krańcach galaktyk spiralnych, takich jak nasza Droga Mleczna. Gwiazdy te krążą wokół swoich galaktyk znacznie szybciej, niż wskazywałoby na to grawitacyjne przyciąganie, którego źródłem są wszystkie gwiazdy należące do danej galaktyki. Co więcej, większość galaktyk jest połączona w gromady, a na podstawie analizy ruchów poszczególnych galaktyk w gromadach dochodzimy również do wniosku o obecności ciemnej materii między galaktykami. Ilość ciemnej materii we wszechświecie znacznie przewyższa ilość zwykłej materii, lecz nawet gdy zsumujemy wszystko, nadal otrzymamy zaledwie jedną dziesiątą tego, co byłoby potrzebne, aby zatrzymać ekspansję wszechświata. Może się jednak okazać, że istnieją jeszcze inne formy ciemnej materii, rozłożone niemal

równomiernie w całym wszechświecie, których jeszcze nie wykryliśmy i które mogą podwyższyć średnią gęstość. Istnieje na przykład pewien typ cząstek elementarnych, zwanych neutrino, które bardzo słabo oddziałują z materią i są niezwykle trudne do wykrycia (w jednym z najnowszych eksperymentów neutronowych zastosowano podziemny detektor wypełniony pięćdziesięcioma tysiącami ton wody). Do niedawna sądzono, że neutrino nie ma masy, a zatem nie oddziałuje grawitacyjnie, lecz eksperymenty wykonane w ciągu ostatnich kilku lat wskazują, że neutrino jednak ma bardzo małą, lecz niezerową masę, której uprzednio nie wykryto. Jeżeli neutrino faktycznie mają masę, to mogą stanowić jedną z form ciemnej materii. Lecz nawet po uwzględnieniu ciemnej materii neutronowej we wszechświecie jest o wiele za mało masy, aby powstrzymać ekspansję, więc jeszcze do niedawna większość fizyków uważała, że wszechświat opisuje drugi model Friedmanna.

W ciągu ostatnich kilku lat pojawiły się jednak pewne nowe obserwacje. Kilka zespołów badaczy studiowało drobne zmarszczki w mikrofalowym promieniowaniu tła* odkrytym przez Penziasa i Wilsona. Rozmiary owych zmarszczek mogą posłużyć jako wskaźnik wielkoskalowej geometrii wszechświata i wydają się sugerować, że wszechświat jest jednak płaski (tak jak w trzecim modelu Friedmanna!). Z drugiej strony wydaje się, że wszechświat nie zawiera dostatecznej ilości zwykłej materii oraz ciemnej materii, więc niektórzy fizycy postulują istnienie kolejnej, dotąd niewykrytej substancji, która mogłaby posłużyć jako wyjaśnienie płaskości wszechświata — ciemnej energii.

Aby jeszcze bardziej skomplikować sytuację, pewne niedawne obserwacje wskazują, że tempo ekspansji wszechświata nie zmniejsza się, lecz wręcz przeciwnie — wzrasta. Tego nie przewiduje żaden z modeli Friedmanna! Co więcej, jest to bardzo dziwne zjawisko, ponieważ obecność materii w przestrzeni, niezależnie od jej gęstości, może jedynie spowalniać ekspansję. Grawitacja stanowi przecież siłę przyciągania. Przyspieszenie kosmicznej ekspansji przypomina coś w rodzaju wybuchu bomby, którego moc wzrasta po eksplozji, zamiast stopniowo maleć. Jaka siła mogłaby być odpowiedzialna za coraz szybsze rozszerzanie się kosmosu? Na razie nikt nie zna odpowiedzi na to pytanie, lecz może się okazać, że Einstein miał jednak rację co do potrzeby wprowadzenia do swoich równań stałej kosmologicznej (wraz z jej antygravitacyjnymi skutkami).

* John C. Mather i George F. Smoot otrzymali Nagrodę Nobla w 2006 r. za badania niejednorodności kosmicznego promieniowania tła.

Wraz z raptownym rozwojem nowych technologii oraz nowych, potężnych teleskopów satelitarnych poznajemy coraz więcej szczegółów dotyczących wszechświata. Mamy obecnie dość dobre pojęcie na temat jego zachowania w dalszej skali czasowej — wszechświat będzie się rozszerzał w coraz szybszym tempie. Czas będzie trwał wiecznie, przynajmniej dla tych z nas, którzy będą dostatecznie ostrożni, aby nie wpaść w czarną dziurę. Ale co wiemy na temat wczesnej fazy istnienia wszechświata? W jaki sposób wszechświat powstał i co spowodowało jego ekspansję?

WIELKI WYBUCH, CZARNE DZIURY I EWOLUCJA WSZECHŚWIATA

W PIERWSZYM MODELU FRIEDMANNA czwarty wymiar wszechświata — czas — jest skończony, podobnie jak wymiary przestrzenne. Przypomina linię z dwoma końcami. Zatem czas ma koniec i ma także początek. Wszystkie rozwiązania równań Einsteina, w których wszechświat zawiera taką ilość masy, jaką obecnie obserwujemy, mają jedną istotną cechę wspólną: w pewnym momencie w przeszłości (około 13,7 miliarda lat temu) odległość między sąsiednimi galaktykami musiała być równa zero. Innymi słowy, cały wszechświat był ściśnięty do jednego punktu o zerowych rozmiarach, czyli do czegoś w rodzaju kuli o promieniu zero. Gęstość wszechświata oraz zakrzywienie czasoprzestrzeni musiały być wtedy nieskończone, a ów moment nazywamy wielkim wybuchem.

Wszystkie nasze teorie kosmologiczne są formułowane przy założeniu, że czasoprzestrzeń jest gładka i niemal płaska. Oznacza to, że wszystkie nasze teorie załamują się w wielkim wybuchu: czasoprzestrzeni o nieskończonym zakrzywieniu nie można przecież nazwać niemal płaską! Nawet jeżeli przed wielkim wybuchem zaszły jakieś zdarzenia, nie moglibyśmy ich wykorzystać do przewidywania tego, co zdarzyło się później, ponieważ przewidywalność została unicestwiona w wielkim wybuchu.

Na tej samej zasadzie nie możemy powiedzieć, co zaszło wcześniej, nawet jeżeli wiemy, co działo się po wielkim wybuchu. Z naszego punktu widzenia zdarzenia, które zaszły przed wielkim wybuchem, nie mogą mieć dla nas konsekwencji, a zatem nie powinny być uwzględniane w naukowym modelu wszechświata. Oznacza to, że nauka nie wypowiada się w takich kwestiach, jak na przykład pytania o to, kto ustanowił warunki dla wielkiego wybuchu.

Jeżeli wszechświat ma zerowe rozmiary, to także jego temperatura jest nieskończona. W momencie wielkiego wybuchu wszechświat był nieskończenie gorący. Gdy zaczął się rozszerzać, temperatura promieniowania stopniowo się zmniejszała. Temperatura jest po prostu miarą średniej ener-

gii — lub prędkości — cząstek, więc ochładzanie wszechświata wywierało potężny wpływ na zawartą w nim materię. W bardzo wysokich temperaturach cząstki poruszały się tak szybko, że nie ulegały wzajemnemu przyciąganiu wynikającemu z oddziaływań jądrowych lub elektromagnetycznych. Gdy wszechświat się ochłodził, cząstki, które się przyciągają, zaczęły się ze sobą łączyć. Nawet rodzaje cząstek istniejących we wszechświecie zależą od temperatury — a zatem także i od wieku — wszechświata.

Arystoteles nie wierzył, że materia jest zbudowana z cząstek, lecz uważał, że jest ciągła. Zgodnie z jego poglądami kawałek materii mógłby być dzielony na coraz mniejsze części bez żadnych ograniczeń — nigdy nie byłoby ziarna materii, którego nie dałoby się podzielić na jeszcze drobniejsze fragmenty. Niektórzy greccy myśliciele, na przykład Demokryt, uważali jednak, że materia jest ziarnista i że wszystko jest zrobione z dużej liczby różnych rodzajów atomów (słowo „atom” oznacza po grecku „niepodzielny”). Dziś wiemy, że rzeczywiście tak jest, w każdym razie w naszym środowisku i w obecnym stanie wszechświata. Lecz atomy naszego wszechświata nie istniały od zawsze, nie są niepodzielne i reprezentują tylko małą część wszystkich rodzajów cząstek we wszechświecie.

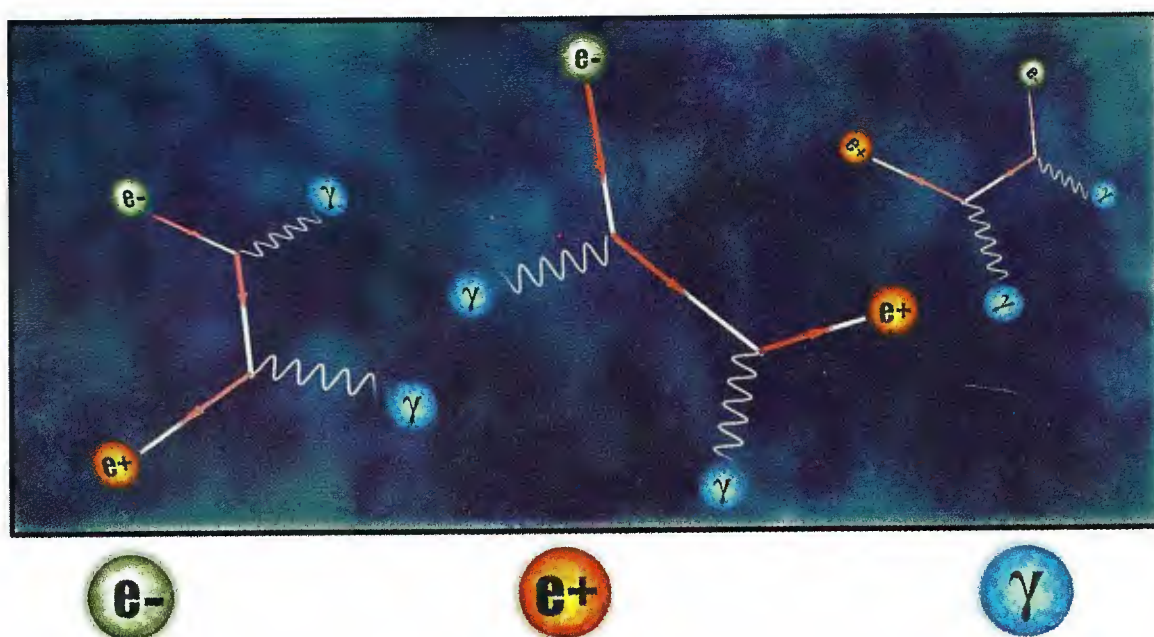
Atomy są zbudowane z mniejszych cząstek: elektronów, protonów i neutronów. Protony i neutrony są z kolei zbudowane z jeszcze mniejszych cząstek zwanych kwarkami. Na dodatek dla każdej z tych subatomowych cząstek istnieje odpowiednia antycząstka. Każda antycząstka ma taką samą masę (oraz niektóre inne, ale nie wszystkie właściwości) jak odpowiadająca jej cząstka, lecz przeciwny ładunek. Na przykład pozyton — antycząstka elektronu — ma dodatni ładunek, w przeciwieństwie do elektronu, którego ładunek jest ujemny.

Być może istnieją całe antyświaty zamieszkane przez antyistoty zbudowane z antycząstek. Gdy antycząstka spotyka odpowiadającą jej cząstkę, dochodzi do ich wzajemnej anihilacji. Jeżeli kiedykolwiek spotkasz swojego antysobowtóra, nie podawaj mu ręki, ponieważ obaj zniknęlibyście w potężnym błysku światła!

Energia świetlna istnieje w nieco innej formie — w postaci bezmasowych cząstek zwanych fotonami. Największym źródłem fotonów dla Ziemi jest pobliskie jądrowe palenisko zwane Słońcem. Jest ono także potężnym źródłem innego rodzaju cząstek, wspomnianych wyżej neutrin (oraz antyneutrin). Te niezwykle lekkie cząstki bardzo słabo oddziałują z materią, dzięki czemu przenikają przez nas bez żadnych efektów w olbrzymich ilościach sięgających miliardów na sekundę. Tak czy inaczej, fizycy odkryli całe tuziny różnych cząstek elementarnych. W miarę upływu czasu, gdy wszechświat przechodził złożoną ewolucję, wraz z nim ewoluowało także

całe to zoo cząstek, dzięki czemu możliwe stało się istnienie takich planet jak Ziemia oraz takich istot jak ludzie.

W ciągu sekundy od wielkiego wybuchu wszechświat rozszerzył się na tyle, że jego temperatura spadła do około dziesięciu miliardów stopni Celsjusza, czyli była niemal tysiąc razy wyższa niż temperatury panujące obecnie w środku Słońca (lecz w trakcie wybuchu bomby wodorowej temperatury mogą osiągać tak wysoki poziom). W tym momencie wszechświat zawierał głównie fotony, elektrony, neutrina oraz ich antycząstki, a także nieco protonów i neutronów. Wszystkie te cząstki miały tak wysokie energie, że gdy się zderzały, produkowały wiele różnych par cząstek i antycząstek. Na przykład zderzające się fotony mogły wyprodukować elektron oraz jego antycząstkę, czyli pozyton. Niektóre z tych wyprodukowanych cząstek mogły zderzać się ze swoimi antycząstkami i anihilować. Gdy elektron napotyka pozyton, oba ulegają anihilacji, lecz odwrotny proces nie jest wcale taki łatwy: aby dwie bezmasowe cząstki, takie jak fotony, mogły wyprodukować parę cząstka/antycząstka, muszą posiadać pewną minimalną energię. Gdy wszechświat się rozszerzał, jego temperatura zmniejszała się, zderzenia cząstek o energii dostatecznej do wytworzenia par elektron/pozyton były coraz rzadsze, aż w końcu zachodziły rzadziej niż



Równowaga fotonowo-elektronowo-pozytonowa

We wczesnym wszechświecie istniała równowaga między zderzeniami elektronów i pozytonów, w wyniku których powstawały fotony, a odwrotnymi procesami. Gdy temperatura wszechświata się zmniejszyła, równowaga uległa zachwianiu na korzyść kreacji fotonów. W końcu większość elektronów i pozytonów we wszechświecie uległa wzajemnej anihilacji, zostawiając jedynie względnie niewielką liczbę elektronów, które istnieją do dzisiaj.

procesy, w których pary były niszczone przez anihilację. W rezultacie większość elektronów i pozytonów uległa wzajemnej anihilacji, produkując fotony i zostawiając tylko względnie niewiele elektronów. Z drugiej strony, neutrino oraz antyneutrino oddziałują ze sobą oraz z innymi cząstkami bardzo słabo, dzięki czemu nie ulegają równie szybkiej anihilacji. Powinny zatem istnieć obecnie w dużych ilościach. Gdybyśmy potrafili je zaobserwować, mielibyśmy wiarygodny test tego obrazu bardzo gorącej, wczesnej fazy wszechświata. Po upływie miliardów lat ich energie są jednak zbyt małe, abyśmy mogli obserwować je bezpośrednio (aczkolwiek pośrednie metody obserwacji są zapewne możliwe).

Po około stu sekundach od wielkiego wybuchu temperatura wszechświata obniżyła się do jednego miliarda stopni. Mniej więcej takie temperatury panują we wnętrzach najgorętszych gwiazd. W takiej temperaturze istotną rolę odgrywa tak zwane silne oddziaływanie jądrowe. Oddziaływanie to, które bardziej szczegółowo omówimy w rozdziale 11, jest odpowiedzialne za krótkozasięgową siłę przyciągania, dzięki której protony i neutrony łączą się ze sobą, tworząc jądra atomowe. Przy bardzo wysokich temperaturach protony i neutrony mają dostatecznie wielką energię kinetyczną (zob. rozdział 5), która powoduje, że mimo nieustannych zderzeń pozostają swobodne i niezależne. Lecz poniżej jednego miliarda stopni nie mają już dostatecznie dużo energii, aby przezwyciężyć przyciąganie, i zaczynają się łączyć ze sobą, tworząc jądra deuteru (ciężkiego izotopu wodoru), które zawierają jeden proton i jeden neutron. Jądra deuteru łączą się z kolei z innymi protonami i neutronami, tworząc jądra helu składające się z dwóch protonów i dwóch neutronów, a także niewielkie ilości kilku cięższych pierwiastków, litu i berylu. Można obliczyć, że w modelu wielkiego wybuchu mniej więcej jedna czwarta protonów i neutronów została zamieniona w jądra helu oraz w niewielkie ilości ciężkiego wodoru oraz innych pierwiastków. Pozostałe neutrony rozpadły się na protony, które stanowią jądra zwykłego wodoru.

Taki obraz wczesnej, gorącej fazy wszechświata został sformułowany przez George'a Gamow (zob. strona 59) w słynnym artykule z 1948 roku napisanym wspólnie z jego studentem, Ralphem Alpherem. Gamow, który był człowiekiem o wyjątkowym poczuciu humoru, nakłonił fizyka jądrowego, Hansa Bethego, aby zgodził się zostać współautorem, dzięki czemu na liście autorów artykułu o początkach wszechświata znalazły się nazwiska Alpher, Bethe i Gamow, przypominające trzy pierwsze litery greckiego alfabetu: alfa, beta i gamma! W artykule tym zawarli oni zdumiewająco trafną hipotezę, że promieniowanie (w postaci fotonów) z bardzo wczesnych etapów ewolucji wszechświata powinno nadal istnieć, lecz

z temperaturą zredukowaną do zaledwie kilku stopni powyżej zera absolutnego (w temperaturze zera absolutnego, -273 stopnie Celsjusza, substancje nie mają energii cieplnej, a zatem jest to najniższa możliwa temperatura).

Właśnie to mikrofalowe promieniowanie Penzias i Wilson odkryli w 1965 roku. Gdy Alpher, Bethe i Gamow pisali swój artykuł, niewiele jeszcze wiedziano o reakcjach jądrowych i oddziaływaniach protonów oraz neutronów. Ich przewidywania dotyczące proporcji różnych pierwiastków we wczesnym wszechświecie nie były zbyt dokładne, lecz obliczenia te zostały później powtórzone na podstawie bardziej szczegółowych danych i obecnie wyniki zgadzają się bardzo dobrze z obserwacjami. Co więcej, niezmiernie trudno byłoby w jakiś inny sposób wyjaśnić, dlaczego około jednej czwartej masy wszechświata istnieje w postaci helu.

Istnieją jednak pewne problemy z tym scenariuszem. W modelu gorącego wielkiego wybuchu energia cieplna nie miała dostatecznie dużo czasu, aby przedostać się z jednego obszaru wczesnego wszechświata do innego. Skoro mikrofalowe promieniowanie tła ma taką samą temperaturę niezależnie od kierunku, w którym spoglądamy, to początkowy stan wszechświata musiałby mieć wszędzie taką samą temperaturę. Co więcej, początkowe tempo ekspansji musiałoby być bardzo precyzyjnie dobrane, aby obecnie było nadal stosunkowo bliskie wartości krytycznej wymaganej do uniknięcia kolapsu. Bez odwoływania się do działania Boga, który świadomie dążył do stworzenia takich istot jak my, bardzo trudno byłoby wyjaśnić, dlaczego wszechświat zaczął się w taki właśnie sposób. Alan Guth z Massachusetts Institute of Technology podjął próbę znalezienia modelu, w którym wiele różnych początkowych konfiguracji prowadziło do czegoś w rodzaju obecnego wszechświata. W tym celu wysunął sugestię, że wczesny wszechświat przeszedł przez fazę bardzo szybkiej ekspansji zwanej ekspansją inflacyjną, co oznacza, że rozszerzał się w coraz szybszym tempie. Zdaniem Gutha promień wszechświata zwiększył się milion milion milion — 1 z trzydziestoma zerami — razy w ciągu maleńkiego ułamka sekundy. Jakikolwiek nieregularności wszechświata zostałyby wygładzone przez taką ekspansję, podobnie jak pofałdowania balonu zostają wygładzone w trakcie jego nadmuchiwania. Dzięki temu inflacja wyjaśnia, w jaki sposób obecny gładki i jednorodny stan wszechświata mógł wyewoluować z któregoś spośród wielu różnych, niejednorodnych stanów początkowych. Obecnie uważamy, że dysponujemy poprawnym modelem wczesnego wszechświata, w każdym razie licząc od około jednej miliardowej z bilionowej z bilionowej części sekundy po wielkim wybuchu.

Wkrótce po tym początkowym zamieszaniu, w ciągu zaledwie kilku godzin po wielkim wybuchu zakończyła się produkcja helu oraz kilku innych pierwiastków, takich jak lit. Następnie przez kilka milionów lat wszechświat kontynuował swoją ekspansję, lecz poza tym nie działo się nic ciekawego. Gdy temperatura spadła w końcu do kilku tysięcy stopni, elektrony i jądra nie miały już wystarczającej energii kinetycznej, aby przezwyciężyć elektromagnetyczne przyciąganie i zaczęły się łączyć, tworząc atomy. Wszechświat jako całość nadal się rozszerzał i ochładzał, lecz niektóre regiony, które były nieco gęstsze niż średnia, rozszerzały się nieco wolniej, ze względu na dodatkowe grawitacyjne przyciąganie.

W pewnych obszarach przyciąganie to spowodowało ostatecznie zatrzymanie ekspansji i zainicjowało kolaps. W trakcie kolapsu niektóre regiony zaczynały także powolną rotację, ze względu na grawitacyjne oddziaływanie z materią znajdującą się poza strefą zapadania. W miarę zmniejszania się rozmiarów zapadającego się obszaru tempo rotacji rosło, na podobnej zasadzie, jak łyżwiarze zaczynają szybciej wirować, gdy przyciągną do ciała rozłożone uprzednio ramiona. W końcu, gdy dany obszar zmniejszył się na tyle, że odpowiednio szybka rotacja zrównoważyła grawitacyjne przyciąganie, powstała rotująca galaktyka w kształcie dysku. Inne regiony, które w początkowej fazie nie zaczęły wirować, przekształciły się w tak zwane galaktyki eliptyczne. W tych przypadkach zatrzymanie kolapsu nastąpiło dlatego, że poszczególne części galaktyki krążą wokół jej środka, natomiast galaktyka jako całość nie wiruje.

W miarę upływu czasu galaktyczny wodór oraz hel zaczął się dzielić na mniejsze chmury, które z kolei zapadały się pod wpływem własnej grawitacji. Wraz ze zmniejszaniem się rozmiarów tych chmur poszczególne atomy coraz częściej zderzały się ze sobą, temperatura gazu rosła, aż w końcu chmura stała się na tyle gorąca, że zaczęły się reakcje fuzji jądrowej, podobne do kontrolowanego wybuchu bomby wodorowej. Reakcje te przekształcają wodór w hel, a uwolnione w ich wyniku ciepło jest emitowane w postaci promieniowania — w ten sposób gwiazdy świecą. Ciepło to zwiększa także ciśnienie gazu, aż zrównoważy ono grawitacyjne przyciąganie i gaz przestaje się zapadać. Tak właśnie z chmur gazu powstają gwiazdy, między innymi nasze Słońce, które przetwarzają wodór w hel i wypromieniowują wytworzoną w procesie transformacji energię w postaci ciepła i światła. Równowaga w gwieździe przypomina trochę sytuację w balonie: ciśnienie powietrza wewnątrz próbuje powiększyć balon, a napięcie gumowej powłoki dąży do jego zmniejszenia.

Gdy chmura gorącego gazu utworzy gwiazdę, pozostaje ona stabilna przez bardzo długi czas, dopóki energia cieplna reakcji jądrowych równo-

waży grawitacyjne przyciąganie. W końcu jednak każda gwiazda wyczerpie swój wodór oraz inne paliwa jądrowe. Paradoksalnie, im większą ilością paliwa gwiazda dysponuje na początku, tym szybciej go spali, ponieważ dla zrównoważenia przyciągania grawitacyjnego musi wytwarzać więcej ciepła. A im gorętsza gwiazda, tym szybciej przebiegają reakcje jądrowe i tym szybciej paliwo zostanie zużyte. Nasze Słońce prawdopodobnie ma zapas paliwa na kolejne pięć miliardów lat, lecz bardziej masywne gwiazdy potrafią zużyć całe swoje paliwo w czasie stu milionów lat, znacznie krótszym od wieku wszechświata.

Gdy gwieździe kończy się paliwo, zaczyna się ochładzać, grawitacja zdobywa przewagę, co powoduje, że gwiazda się kurczy. Kurczenie gwiazdy powoduje ściskanie atomów i w rezultacie gwiazda ponownie się rozgrzewa, aż do momentu, gdy zacznie przetwarzać hel w cięższe pierwiastki, takie jak węgiel i tlen. Reakcje te nie są jednak tak wydajne jak przemiana wodoru w hel, więc dość szybko dochodzi do ponownego kryzysu. Nie jesteśmy całkowicie pewni, co się dzieje, gdy gwieździe skończą się wszystkie zapasy paliwa, lecz wydaje się, że centralne obszary gwiazdy zapadają się do bardzo gęstego stanu. Jednym z możliwych stanów końcowych gwiazd jest czarna dziura. Określenie „czarna dziura” pojawiło się stosunkowo niedawno — stworzył je w 1969 roku amerykański fizyk John Wheeler dla obrazowego zilustrowania idei, która liczy co najmniej dwieście lat i pochodzi z epoki, w której istniały dwie teorie światła: jedna, faworyzowana przez Newtona, stwierdzała, że światło jest strumieniem cząstek, druga teoria opisywała światło jako falę. Obecnie wiemy, że obie teorie są poprawne. Jak zobaczymy w rozdziale 9, dzięki dualizmowi falowo-korpuskularnemu mechaniki kwantowej światło może być uważane zarówno za falę, jak i za cząstkę. Określenia „fala” i „cząstka” stanowią koncepcje, które ludzie stworzyli do opisu postrzeganych przez siebie zjawisk, lecz natura nie jest zobligowana do respektowania zasady, że każde zjawisko w przyrodzie musi być jednoznacznie przypisane tylko do jednej z tych dwu kategorii!

W ramach teorii falowej nie było jasne, w jaki sposób fala świetlna reaguje na grawitację, lecz jeśli wyobrazimy sobie światło jako strumień cząstek, możemy oczekiwać, że grawitacja będzie na nie działać tak samo jak na pociski armatnie, rakiety i planety. W szczególności, jeżeli wystrzelimy raketę pionowo z powierzchni Ziemi — lub gwiazdy — tak jak na rycinie na stronie 73, rakietę wzbije się na pewną wysokość, a następnie spadnie z powrotem na Ziemię, jeżeli jej prędkość startowa nie przekracza pewnej określonej wartości. Taka minimalna prędkość jest nazywana prędkością ucieczki. Zależy ona od siły grawitacyjnego przyciągania. Im



Prędkość ucieczki

Nie wszystkie pociski spadają z powrotem – wystarczy wystrzelić je z prędkością większą od prędkości ucieczki.

bardziej masywna gwiazda, tym większa będzie prędkość ucieczki z jej powierzchni. Początkowo ludzie sądzili, że cząstki światła podróżują z nieskończoną prędkością, więc grawitacja nie byłaby w stanie spowolnić ich lotu. Jednak po odkryciu przez Rømera skończonej prędkości światła okazało się, że grawitacja może być przyczyną ważnego efektu: jeżeli gwiazda jest dostatecznie masywna, prędkość światła będzie mniejsza od prędkości ucieczki i emitowane przez gwiazdę światło „spadnie” z powrotem na jej powierzchnię. W 1783 roku uczoney z Cambridge, John Michell, opublikował w „Philosophical Transactions of the Royal Society” artykuł, w którym zwrócił uwagę, że wokół gwiazdy o dużej masie i odpowiednio małych rozmiarach pole grawitacyjne będzie tak silne, że światło nie zdoła z niej uciec. Światło będzie tak silnie przyciągane, że zostanie zawrócone, zanim zdoła się oddalić. Taki obiekt nazywamy obecnie czarną dziurą, ponieważ tym właśnie jest: czarną pustką w kosmosie.

Podobną sugestię kilka lat później, niezależnie od Michella, wysunął francuski uczoney, markiz de Laplace, w swoim dziele *Exposition du système*

du monde. Idea ta znalazła się w pierwszym oraz drugim wydaniu, lecz Laplace usunął ją z późniejszych wydań, zapewne w przekonaniu, że była to nieco szalona koncepcja. W dziewiętnastym wieku korpuskularna teoria światła stopniowo traciła znaczenie, ponieważ wydawało się, że wszystko można wyjaśnić za pomocą teorii falowej. W rzeczywistości traktowanie światła na równi z pociskami armatnimi z Newtonowskiej teorii grawitacji nie jest całkowicie poprawne, ponieważ prędkość światła jest niezmienna. Pocisk wystrzelony z powierzchni Ziemi będzie stopniowo zwalniał pod wpływem grawitacji, aż w końcu zatrzyma się i zawróci, lecz foton musi lecieć w górę ze stałą prędkością. Zrozumienie oddziaływania grawitacji na światło stało się możliwe dopiero po odkryciu ogólnej teorii względności przez Einsteina w 1915 roku. Problem masywnej gwiazdy w ramach teorii Einsteina został po raz pierwszy rozwiązany w 1939 roku przez młodego fizyka amerykańskiego, Roberta Oppenheimera.

Obraz, jaki wyłania się z pracy Oppenheimera, jest następujący. Pole grawitacyjne powoduje, że czasoprzestrzenna trajektoria promieni świetlnych przebiegających w pobliżu gwiazdy jest inna, niż byłaby pod jej nieobecność. Ten efekt jest odpowiedzialny za ugięcie światła odległych gwiazd obserwowane w trakcie zaćmienia Słońca. Trajektorie, wzdłuż których światło porusza się w czasoprzestrzeni, są lekko ugięte w pobliżu powierzchni gwiazdy. Gdy gwiazda się kurczy, jej gęstość się powiększa i pole grawitacyjne na jej powierzchni staje się silniejsze (aby to zrozumieć, można sobie wyobrazić pole grawitacyjne rozchodzące się z punktu w samym środku gwiazdy; gdy gwiazda się kurczy, jej powierzchnia przybliża się do tego punktu, więc grawitacja na powierzchni staje się silniejsza). Im silniejsze pole, tym mocniej zakrzywione są trajektorie światła w pobliżu powierzchni. Gdy gwiazda skurczy się poniżej pewnych granicznych rozmiarów, pole grawitacyjne na jej powierzchni staje się tak silne, że trajektorie światła zostają ugięte do tego stopnia, iż światło już nie może uciec.

Zgodnie z teorią względności nic nie może poruszać się szybciej od światła. Jeżeli światło nie może uciec, to z powierzchni takiej gwiazdy nie ucieknie żaden inny obiekt. Wszystko zostanie powstrzymane przez jej pole grawitacji. Gwiazda tworzy wokół siebie obszar czasoprzestrzeni, z którego nie da się dotrzeć do odległego obserwatora. Ten obszar jest czarną dziurą. Jej zewnętrzna granica jest nazywana horyzontem zdarzeń. Dzisiaj — dzięki Kosmicznemu Teleskopowi Hubble'a oraz innym teleskopom, które nie rejestrują światła, lecz promienie X oraz gamma — wiemy, że czarne dziury stanowią powszechne zjawisko, znacznie powszechniejsze, niż uprzednio sądziliśmy. Jeden z satelitów odkrył pięćset czarnych dziur w niewielkim obszarze nieba. Odkryliśmy także w centrum naszej

własnej Galaktyki czarną dziurę o masie ponad milion razy większej niż masa Słońca. Wokół tej potężnej czarnej dziury krąży gwiazda, poruszając się z prędkością orbitalną wynoszącą około 2 procent prędkości światła, szybciej niż prędkość elektronu na orbicie w atomie wodoru!

Aby zrozumieć, co naprawdę zobaczylibyśmy, obserwując kolaps masywnej gwiazdy i powstanie czarnej dziury, należy pamiętać, że w ogólnej teorii względności nie istnieje absolutny czas. Upływ czasu dla obserwatora znajdującego się na powierzchni gwiazdy byłby inny niż dla kogoś znajdującego się w znacznej odległości, ponieważ pole grawitacyjne w pobliżu gwiazdy jest silniejsze.

Przypuśćmy, że odważny astronauta znajduje się na powierzchni gwiazdy i decyduje się pozostać tam w trakcie kolapsu. W pewnym momencie — powiedzmy, o godzinie 11.00 według wskazań jego zegarka — gwiazda skurczy się poniżej promienia krytycznego, a pole grawitacyjne stanie się na tyle silne, że ucieczka będzie niemożliwa. Zgodnie z uprzednio ustalonym harmonogramem komunikacji 58 sekund po godzinie 10.59, czyli na dwie sekundy przed kolapsem, astronauta zaczyna wysyłać co sekundę sygnały do statku kosmicznego znajdującego się w bezpiecznej odległości od gwiazdy. Co zarejestrują jego towarzysze na statku?

Z naszych poprzednich eksperymentów myślowych na pokładzie statku kosmicznego wiemy, że grawitacja spowalnia upływ czasu. Im silniejsza grawitacja, tym ten efekt jest silniejszy. Astronauta na powierzchni gwiazdy znajduje się w obszarze silniejszego pola grawitacyjnego niż jego macierzysty statek na swojej orbicie, więc to, co dla niego będzie jedną sekundą, na zegarach statku będzie dłuższym odcinkiem czasu. W miarę zapadania się powierzchni gwiazdy pole grawitacyjne staje się coraz silniejsze, zatem odstępy czasu między wysyłanymi przez niego kolejnymi sygnałami będą coraz dłuższe. Przed 59 sekundą godziny 10.59 efekt będzie jednak nieznaczny, więc orbitujący astronauta będą musieli czekać tylko troszkę więcej niż jedną sekundę między sygnałem 10.58.58 a sygnałem wysłanym w momencie, gdy zegarek astronauty na powierzchni wskazywał 10.59.59. Na sygnał wysłany o 11.00 będą jednak czekać wiecznie.

Wszystko, co na powierzchni gwiazdy zdarzy się między 10.59.59 a 11.00 (według zegarka astronauty), z punktu widzenia orbitującego statku będzie rozciągnięte do nieskończonego długiego czasu. Tuż przed godziną 11.00 odcinki czasu między kolejnymi grzbietami lub dolinami jakiegokolwiek fali świetlnej nadbiegającej od gwiazdy będą coraz dłuższe, podobnie jak odstępy między wysyłanymi przez astronautę sygnałami. Częstotliwość światła jest mierzona jako liczba grzbietów lub dolin na sekundę, obserwatorzy na statku będą rejestrować coraz niższą częstotliwość

docierającego do nich światła. Zatem będzie ono coraz bardziej czerwone i coraz słabsze. W końcu gwiazda będzie świecić tak słabo, że przestanie być widoczna ze statku i zostanie po niej tylko czarna dziura w przestrzeni. Będzie jednak nadal działać taką samą siłą grawitacji na statek, który nadal będzie krążył po orbicie.

Istnieje jednak pewien problem, z powodu którego powyższy scenariusz nie jest całkowicie realistyczny. Im dalej od powierzchni gwiazdy, tym grawitacja jest słabsza, więc siła działająca na stopy naszego dzielnego astronauty zawsze będzie większa niż siła działająca na jego głowę. Ta różnica spowoduje, że zostanie on rozciągnięty jak spaghetti lub nawet rozerwany, zanim gwiazda skurczy się do krytycznych rozmiarów, poniżej których powstanie horyzont zdarzeń! Sądzymy jednak, że istnieją we wszechświecie znacznie większe obiekty, takie jak centralne regiony galaktyk, które także mogą ulegać grawitacyjnemu kolapsowi i tworzyć czarne dziury — na przykład supermasywną czarną dziurę w centrum naszej Galaktyki. Astronauta znajdujący się na horyzoncie zdarzeń takiego obiektu nie zostanie rozerwany przed powstaniem czarnej dziury. W gruncie rzeczy nie zauważy on niczego szczególnego w momencie osiągnięcia krytycznego promienia i przejdzie przez punkt bez powrotu, nie zdając sobie z tego sprawy. Do obserwatorów na zewnątrz jego sygnały będą jednak docierać coraz rzadziej, aż w końcu całkiem przestaną. Natomiast obszar, w którym on sam się znajduje, będzie kontynuował kolaps i w ciągu zaledwie kilku godzin (według jego zegarka) różnica grawitacyjnego oddziaływania na jego głowę i nogi stanie się tak duża, że astronauta zostanie jednak rozerwany.

Gdy kolapsowi ulega bardzo masywna gwiazda, jej zewnętrzne obszary mogą zostać odrzucone na zewnątrz w gigantycznej eksplozji zwanej supernową. Supernowa stanowi tak potężne zjawisko, że może emitować więcej światła niż wszystkie inne gwiazdy jej macierzystej galaktyki razem wzięte. Pozostałości supernowej widzimy na niebie w postaci Mgławicy Kraba. Chińscy astronomowie zarejestrowali jej wybuch w 1054 roku. Eksplodująca gwiazda znajdowała się w odległości pięciu tysięcy lat świetlnych, lecz przez wiele miesięcy była dostrzegalna gołym okiem, świeciła tak jasno, że była widoczna nawet w dzień, a w nocy można było czytać przy jej świetle. Supernowa odległa o pięćset lat świetlnych — znajdująca się dziesięć razy bliżej — byłaby sto razy jaśniejsza i mogłaby dosłownie zamienić noc w dzień. Aby pojąć potęgę takiej eksplozji, należy sobie uświadomić, że jej światło konkurowałoby pod względem jasności ze Słońcem, mimo że źródło znajdowałoby się dziesiątki milionów razy dalej (przypomnijmy, że Słońce dzieli od Ziemi stosunkowo niewielką odległość ośmiu minut świetlnych). Blisko położona supernowa pozostawiłaby Ziemię nie-



Siły pływowe

Grawitacja słabnie wraz z odległością, więc Ziemia przyciąga naszą głowę nieco słabiej niż nasze stopy, które są około dwóch metrów bliżej środka Ziemi. Na naszej planecie różnica jest tak mała, że jej nie odczuwamy, lecz astronauta w pobliżu powierzchni czarnej dziury zostałby dosłownie rozerwany.

naruszoną, lecz emitowałaby tyle promieniowania, że mogłaby unicestwić wszelkie życie na naszej planecie. Niedawno wysunięto zresztą sugestię, że wymieranie morskich istot, do którego doszło na przełomie plejstocenu i pliocenu około dwóch milionów lat temu, było spowodowane przez promieniowanie supernowej zlokalizowanej w pobliskiej gromadzie gwiazd zwanej asocjacją Skorpiona–Centaura. Niektórzy naukowcy sądzą, że zaawansowane życie ma szansę wyewoluować tylko w takich obszarach galaktyk — „strefach życia” — gdzie nie ma zbyt wielu gwiazd, ponieważ w regionach o większej gęstości takie zjawiska jak supernowe są na tyle

częste, że regularnie unicestwiają wszelkie załączki ewolucji. Średnio rzecz biorąc, setki tysięcy supernowych dziennie eksploduje gdzieś we wszechświecie. W jednej galaktyce zdarza się jedna supernowa na stulecie. To jednak tylko średnia. Niestety — w każdym razie dla astronomów — ostatnia supernowa zaobserwowana w Drodze Mlecznej zdarzyła się w 1604 roku, przed wynalezieniem teleskopu.

Czołową kandydatką na kolejną supernową w naszej Galaktyce jest gwiazda zwana ro Kasjopei, która szczęśliwie znajduje się w bezpiecznej odległości dziesięciu tysięcy lat świetlnych od nas. Należy ona do klasy gwiazd zwanych żółtymi nadolbrzymami, których tylko siedem zaobserwowano w całej Drodze Mlecznej. Międzynarodowy zespół astronomów zaczął obserwacje tej gwiazdy w 1993 roku. W ciągu kilku kolejnych lat zaobserwowali oni okresowe fluktuacje temperatury sięgające kilkuset stopni. Następnie w lecie 2000 roku temperatura gwiazdy nagle obniżyła się z około 7000 stopni do około 4000 stopni Celsjusza. W tym samym okresie w atmosferze gwiazdy wykryto także tlenek tytanu, który zdaniem astronomów stanowi część zewnętrznej warstwy odrzuconej w przestrzeń przez potężną falę uderzeniową.

W wyniku wybuchu supernowej pewna ilość cięższych pierwiastków, wyprodukowanych pod koniec życia gwiazdy, zostaje wyrzucona w przestrzeń i staje się surowcem dla kolejnego pokolenia gwiazd galaktyki. Nasze Słońce zawiera około 2 procent tych cięższych pierwiastków. Jest ono gwiazdą drugiej lub trzeciej generacji, powstała około pięciu miliardów lat temu z chmury wirującego gazu zawierającego pozostałości wcześniejszych supernowych. Większość gazu z tej chmury utworzyła Słońce lub została odrzucona w przestrzeń, lecz niewielkie ilości cięższych pierwiastków utworzyły ciała, które obecnie krążą wokół Słońca w postaci planet. Złoto w naszej biżuterii oraz uran w naszych reaktorach stanowią pozostałości supernowych, które eksplodowały przed powstaniem Układu Słonecznego!

Gdy nasza planeta została uformowana, początkowo była bardzo gorąca i pozbawiona atmosfery. W miarę upływu czasu ochładzała się i gromadziła atmosferę pochodzącą z emisji gazów przez skały. Ta wczesna atmosfera nie byłaby zdolna do podtrzymania życia takich istot jak my. Nie zawierała tlenu, natomiast było w niej mnóstwo innych gazów, które są dla nas trujące, na przykład siarkowodoru (gazu odpowiedzialnego za zapach gnijących jajek). Istnieją jednak inne, prymitywne formy życia, które mogą się rozwijać w takich warunkach. Naukowcy sądzą, że rozwinęły się one w oceanach zapewne jako wynik przypadkowych połączeń atomów w większe struktury zwane makromolekułami, które były zdolne do ini-

cjowania połączeń innych atomów w podobne struktury. W ten sposób mogły się one replikować i rozmnażać. W niektórych przypadkach w procesach reprodukcji pojawiały się błędy, które najczęściej uniemożliwiały dalszą reprodukcję i ostatecznie prowadziły do zagłady danej makromolekuły. Niektóre z tych błędów mogły jednak doprowadzić do powstania nowych makromolekuł, które były jeszcze skuteczniejsze pod względem zdolności do rozmnażania. Przewaga w reprodukcji prowadziła na ogół do wypierania oryginalnych makromolekuł. W ten sposób zaczął się proces ewolucji, który prowadził do rozwoju coraz bardziej złożonych, samoreprodukujących się organizmów. Pierwsze prymitywne formy życia pochłaniały różne substancje, między innymi siarkowodór, natomiast wypuszczały do atmosfery tlen. Skład atmosfery stopniowo się zmieniał, umożliwiając rozwój wyższych form życia, takich jak ryby, gady, ssaki i w końcu doprowadził do powstania rodzaju ludzkiego.

Wiek dwudziesty był świadkiem transformacji naszych poglądów na wszechświat: uświadomiliśmy sobie niepozorny status naszej planety w ogromnym wszechświecie, odkryliśmy, że czas oraz przestrzeń są zakrzywione i nierozdzielne, że wszechświat się rozszerza i że czas miał początek.

Obraz wszechświata, który zaczął się od bardzo gorącej fazy, a następnie ochładzał się i rozszerzał, jest oparty na Einsteinowskiej teorii grawitacji — ogólnej teorii względności. Zgodność ze wszystkimi obecnie dostępnymi dowodami obserwacyjnymi to wielki triumf tej teorii. Lecz matematyczna struktura tej teorii nie obejmuje nieskończonych liczb, mimo iż teoria przewiduje, że wszechświat zaczął się od wielkiego wybuchu, gdy gęstość wszechświata oraz zakrzywienie czasoprzestrzeni były nieskończone. W ten sposób ogólna teoria względności sama w sobie przewiduje istnienie takiego punktu wszechświata, w którym równania teorii się załamują. Ten punkt jest przykładem tak zwanej osobliwości. Gdy teoria przewiduje osobliwości, takie jak nieskończona gęstość i zakrzywienie, stanowią one sygnał, że teoria musi zostać w jakiś sposób zmodyfikowana. Ogólna teoria względności jest teorią niekompletną, ponieważ nie potrafi nam powiedzieć, w jaki sposób wszechświat się zaczął.

Oprócz teorii względności dwudziesty wiek dał nam także inną wielką teorię natury, mechanikę kwantową. Opisuje ona obiekty oraz zjawiska zachodzące w bardzo małych skalach. Nasz obraz wielkiego wybuchu mówi, iż musiał nastąpić taki moment w bardzo wczesnej fazie istnienia wszechświata, gdy wszechświat był tak mały, że nawet przy analizie jego wielkoskalowej struktury nie można ignorować efektów mechaniki kwantowej. W następnym rozdziale zobaczymy, że nasze największe nadzieje na pełne zrozumienie wszechświata od początku do końca wiążą się z połącze-

niem tych dwóch cząstkowych teorii w jedną kwantową teorię grawitacji, w ramach której zwykle prawa fizyki są słuszne wszędzie, także na początku czasu, bez konieczności odwoływania się do osobliwości.

GRAWITACJA KWANTOWA

POD WPŁYWEM SUKCESÓW TEORII NAUKOWYCH, a w szczególności teorii grawitacji Newtona, markiz de Laplace stwierdził na początku dziewiętnastego wieku, że wszechświat jest całkowicie deterministyczny. Laplace sądził, że powinien istnieć zbiór praw przyrody, który pozwalałby — przynajmniej w zasadzie — przewidzieć wszystko, co zdarzy się we wszechświecie. Jedyny warunek stanowiłaby pełna znajomość stanu wszechświata w jakimś wcześniejszym momencie, czyli tak zwanych warunków początkowych lub warunków brzegowych (określenie „brzegowy” może się odnosić do brzegu w przestrzeni lub w czasie; warunek brzegowy w przestrzeni oznacza stan wszechświata na jego zewnętrznej granicy — o ile ją posiada). Laplace sądził, że dysponując kompletem praw przyrody oraz odpowiednim warunkiem początkowym lub brzegowym, będziemy mogli obliczyć stan wszechświata w dowolnym momencie.

Koncepcja warunków początkowych jest prawdopodobnie intuicyjnie oczywista: różne stany wszechświata w chwili obecnej prowadzą do różnych stanów w przyszłości. Koncepcja warunków brzegowych w przestrzeni jest nieco bardziej subtelna, lecz zasada jest taka sama. Równania wynikające z praw przyrody mogą na ogół mieć różne rozwiązania. Wybór konkretnego rozwiązania zależy od konkretnych warunków początkowych lub brzegowych. Można powiedzieć, że na twoje konto bankowe wpływają i wypływają duże kwoty, ale to, czy zostaniesz bogaczem czy bankrutem, zależy nie tylko od salda wpływów i wydatków, ale także od warunków brzegowych lub początkowych, czyli od stanu konta na samym początku.

Jeżeli Laplace miał rację, to na podstawie znajomości stanu wszechświata w chwili obecnej powinniśmy móc określić stan wszechświata zarówno w przyszłości, jak i w przeszłości. Na przykład, znając położenia i prędkości Słońca oraz planet, możemy użyć praw Newtona i obliczyć stan Układu Słonecznego w dowolnej wcześniejszej lub późniejszej chwili. Astronomo-

wie potrafią bardzo dokładnie przewidywać zaćmienia i inne tego typu zjawiska, więc determinizm wydaje się dość oczywisty w przypadku planet. Laplace poszedł jednak znacznie dalej i wysunął hipotezę, że istnieją podobne prawa rządzące wszystkimi innymi zjawiskami, łącznie z zachowaniami ludzi.

Czy faktycznie możliwe jest obliczanie, jakie będą nasze działania w przyszłości? Szklanka wody zawiera ponad 10^{24} cząsteczek (1 z dwudziestoma czterema zerami). W praktyce nie mamy żadnych nadziei, że poznamy stan każdej z tych molekuł, nie mówiąc już o stanie całego wszechświata lub choćby ludzkiego ciała. Lecz stwierdzenie, że wszechświat jest deterministyczny, oznacza, iż nasza przyszłość jest tak czy inaczej zdeterminowana niezależnie od tego, czy mamy dostatecznie potężne mózgi, aby to obliczyć.

Doktryna naukowego determinizmu była zdecydowanie kwestionowana przez wielu ludzi, którzy sądzili, że narusza ona swobodę Boga w sterowaniu światem tak, jak mu się podoba, lecz pozostała standardowym paradygmatem nauki aż do początków dwudziestego wieku. Jedną z pierwszych wskazówek, że doktryna ta będzie musiała być porzucona, pojawiła się, gdy brytyjscy uczeni, lord Rayleigh i sir James Jeans, obliczyli ilość promieniowania, jakie musi emitować gorące ciało, takie jak na przykład gwiazda (w rozdziale 7 wspomnieliśmy o promieniowaniu ciała doskonale czarnego, które musi emitować każde rozgrzane ciało).

Zgodnie z ówczesnie obowiązującymi prawami rozgrzane ciało powinno emitować fale elektromagnetyczne jednakowo w całym zakresie częstotliwości. Gdyby to była prawda, ciało emitowałoby jednakowe ilości energii w każdym kolorze widma światła widzialnego, a także na wszystkich częstotliwościach mikrofal, fal radiowych, promieni X i tak dalej. Przypomnijmy, że częstotliwość fali jest równa liczbie fal na sekundę, czyli liczbie mówiącej, ile razy na sekundę fala oscyluje w górę i w dół. Matematycznie oznacza to, że jeżeli rozgrzane ciało emituje pewną ilość energii w postaci fal o częstotliwościach między zerem a jednym milionem fal na sekundę, to powinno emitować taką samą ilość energii w postaci fal o częstotliwościach między jednym milionem a dwoma milionami fal na sekundę, taką samą ilość energii w postaci fal o częstotliwościach między dwoma milionami a trzema milionami fal na sekundę i tak dalej w nieskończoność. Przyjmijmy, że w przedziale częstotliwości między zerem a jednym milionem fal na sekundę ciało emituje ilość energii równą jeden w pewnych określonych jednostkach, w przedziale częstotliwości między jednym milionem a dwoma milionami fal na sekundę także jedną jednostkę energii i tak dalej. Całkowita ilość energii emitowana na wszystkich częstotliwościach byłaby

zatem równa 1 plus 1 plus 1 plus... i tak w nieskończoność. Liczba fal na sekundę jest nieograniczona, więc powyższa suma energii jest także nieskończona. Zgodnie z tym rozumowaniem całkowita energia emitowana przez ciało doskonale czarne byłaby nieskończona.

Aby wyjaśnić ten absurdalny wynik, niemiecki uczyony Max Planck zasugerował w 1900 roku, że światło, promienie X oraz inne formy fal elektromagnetycznych mogą być emitowane tylko w pewnych określonych ilościach — w postaci pakietów lub paczek, które nazwał kwantami. Dzisiaj, jak wspomnieliśmy w rozdziale 8, kwant światła nazywamy fotonem. Im większa jest częstotliwość światła, tym większa energia fotonu. Teoria Plancka stwierdza, że fotony pewnego określonego koloru — czyli o jednakowej częstotliwości — są wszystkie identyczne, lecz fotony o różnych częstotliwościach niosą różne ilości energii. Oznacza to, że w teorii kwantowej najśłabsze światło danego koloru, czyli jeden foton, zawiera energię, która zależy od jego koloru. Na przykład jeden kwant światła fioletowego zawiera dwa razy więcej energii od jednego kwantu czerwonego światła,



Najśłabsze możliwe światło

Śłabsze światło oznacza mniej fotonów. Najśłabsze możliwe światło dowolnego koloru stanowi promieniowanie przenoszone przez jeden foton.

ponieważ częstotliwość fioletowego światła jest dwa razy większa od częstotliwości czerwonego światła.

W jaki sposób hipoteza Plancka rozwiązuje problem ciała doskonale czarnego? Najmniejsza ilość energii elektromagnetycznej, jaką ciało może wyemitować przy określonej częstotliwości, jest równoważna energii jednego fotonu o tej właśnie częstotliwości. Energia fotonu jest tym wyższa, im większa jest częstotliwość. Zatem przy coraz wyższych częstotliwościach najmniejsza ilość energii, jaką ciało może wyemitować, jest coraz większa. Przy dostatecznie wysokiej częstotliwości ilość energii unoszona nawet przez jeden kwant będzie większa niż całkowita energia, jaką ciało może zainwestować w promieniowanie, więc nie będzie ono w ogóle emitować fal o częstotliwościach przewyższających pewną progową wartość. W takiej sytuacji powyższa nieskończona suma zostanie jednak w którymś miejscu przerwana. W teorii Plancka promieniowanie o wysokich częstotliwościach jest zredukowane, dzięki czemu tempo, w jakim ciało traci energię, jest skończone, co rozwiązuje problem ciała doskonale czarnego.

Hipoteza kwantowa bardzo dobrze wyjaśniała obserwowane tempo emisji promieniowania przez rozgrzane ciała, lecz jej implikacje dla naukowego determinizmu zostały odkryte dopiero w 1926 roku, gdy inny niemiecki uczyony, Werner Heisenberg, sformułował swoją słynną zasadę nieoznaczoności.

Zasada nieoznaczoności mówi, że — wbrew przekonaniom Laplace'a — natura nakłada ograniczenia na nasze możliwości przewidywania przyszłości za pomocą praw przyrody. Chcąc przewidzieć położenie i prędkość cząstki w przyszłości, trzeba najpierw dokładnie zmierzyć jej stan początkowy, czyli jej obecne położenie oraz prędkość. Aby to uczynić, można oświetlić cząstkę światłem. Część fal odbije się od cząstki, a następnie może zostać zarejestrowana, wskazując położenie cząstki. Dokładność takiego pomiaru jest jednak ograniczona przez długość fali użytego światła, czyli odległość dwóch sąsiednich grzbietów fali — nie da się wyznaczyć położenia cząstki bardziej precyzyjnie. Aby poprawić dokładność pomiaru, można użyć światła o mniejszej długości fali, czyli o większej częstotliwości. Kwantowa hipoteza Plancka mówi z kolei, że nie można użyć dowolnie małej ilości światła — niezbędny jest przynajmniej jeden kwant, którego energia jest tym większa, im większa częstotliwość. W rezultacie, im bardziej dokładny pomiar położenia cząstki chcemy wykonać, tym więcej energii musi mieć kwant światła, którym strzelamy w cząstkę.

W teorii kwantowej nawet jeden kwant światła zmieni stan cząstki — zmieni jej prędkość w sposób, którego nie da się przewidzieć. A im większa energia użytego kwantu światła, tym większe zaburzenie ruchu cząstki.

Oznacza to, że im bardziej dokładny pomiar położenia cząstki zechcemy wykonać, tym więcej energii musi mieć użyty kwant, a zatem w tym większym stopniu zaburzymy prędkość cząstki. Im bardziej precyzyjny pomiar położenia cząstki próbujemy wykonać, tym mniej dokładnie możemy zmierzyć jej prędkość, i vice versa. Heisenberg pokazał, że niepewność położenia cząstki, pomnożona przez niepewność jej prędkości, pomnożona jeszcze przez masę cząstki — nie może być mniejsza niż pewna ustalona wielkość fizyczna. Oznacza to na przykład, że jeżeli zwiększymy dwukrotnie dokładność pomiaru położenia cząstki, musimy dwukrotnie zmniejszyć dokładność pomiaru prędkości, i vice versa. Natura zawsze zmusza nas do takiego kompromisu.

Jak bardzo dotkliwy jest ten kompromis? Zależy to oczywiście od liczbowej wartości wspomnianej powyżej „ustalonej wielkości fizycznej”. Jest ona znana jako stała Plancka, i jest to bardzo mała liczba. A skoro jest bardzo mała, to efekty powyższego kompromisu — i efekty teorii kwantowej w ogólności — nie są bezpośrednio widoczne w naszym codziennym życiu, podobnie zresztą jak efekty teorii względności (aczkolwiek pośredni wpływ teorii kwantowej na nasze życie jest ogromny, ponieważ stanowi ona teoretyczną podstawę takich dziedzin, jak na przykład nowoczesna elektronika). Jeżeli na przykład w przypadku piłeczki do ping-ponga o masie jednego grama zmierzmy położenie z dokładnością do jednego centymetra, to możemy także zmierzyć jej prędkość z dokładnością znacznie lepszą, niż kiedykolwiek będziemy potrzebować. Jeżeli jednak zmierzmy położenie elektronu z dokładnością mniej więcej taką jak rozmiary atomu, to nie będziemy znali prędkości elektronu dokładniej niż plus minus tysiąc kilometrów na sekundę, czyli niezbyt precyzyjnie.

Ograniczenie, które narzuca zasada nieoznaczoności, nie zależy od sposobu pomiaru położenia lub prędkości cząstki ani od typu cząstki. Zasada nieoznaczoności Heisenberga stanowi fundamentalną, nieuniknioną cechę wszechświata, a jej implikacje dla naszego postrzegania wszechświata są również poważne i nieuniknione. Po siedemdziesięciu latach od jej odkrycia implikacje te nie zostały jeszcze w pełni docenione przez wielu filozofów i nadal stanowią przedmiot ogromnych kontrowersji. Zasada nieoznaczoności położyła kres marzeniom o teorii naukowej opisującej całkowicie deterministyczny model wszechświata, zasugerowany przez Laplace’a. Z pewnością nie możemy dokładnie przewidzieć przyszłych zdarzeń, skoro nie potrafimy dokładnie zmierzyć obecnego stanu wszechświata!

Nadal możemy sobie wyobrazić zbiór praw, które całkowicie determinują przyszłe zdarzenia dla jakichś nadnaturalnych istot, jeżeli istoty owe, w odróżnieniu od nas, potrafią obserwować obecny stan wszechświata, nie

zaburzając go. Takie modele wszechświata są jednak mało przydatne dla nas, zwykłych śmiertelników. Rozsądniejsze wydaje się użycie brzytwy Ockhama i usunięcie wszystkich elementów teorii, których nie można obserwować. Stosując takie podejście, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Paul Dirac i inni fizycy przeformułowali mechanikę Newtonowską i stworzyli (w latach dwudziestych ubiegłego wieku) nową teorię opartą na zasadzie nieoznaczoności i obecnie zwaną mechaniką kwantową. W ramach tej teorii stanu cząstek nie opisuje się już, podając równocześnie dobrze określone położenia i prędkości, lecz przez stany kwantowe, które stanowią kombinacje położenia i prędkości zdefiniowane w kategoriach określonych przez zasadę nieoznaczoności.

Jedną z rewolucyjnych cech mechaniki kwantowej polega na tym, że nie przewiduje ona pojedynczego, określonego rezultatu obserwacji, lecz projektuje szereg różnych możliwych wyników i mówi nam, jak bardzo są one prawdopodobne. Oznacza to, że jeżeli wykonamy taki sam pomiar na dużej liczbie identycznych układów, za każdym razem zaczynając od takich samych warunków początkowych, okaże się, że wynik doświadczenia będzie równy A w pewnej liczbie przypadków, B — w pewnej innej liczbie przypadków i tak dalej. Można przewidzieć przybliżoną liczbę przypadków, gdy rezultat będzie równy A (lub B), lecz nie da się przewidzieć określonego rezultatu pojedynczego pomiaru.

Wyobraźmy sobie na przykład, że rzucamy rzutką do tarczy. Według klasycznych — czyli niekwantowych — teorii rzutka albo trafi, albo nie trafi w środek tarczy. Jeżeli znamy prędkość rzutki w momencie rzutu, siłę grawitacji oraz inne czynniki, możemy obliczyć, jaki będzie rezultat rzutu. Teoria kwantowa mówi nam jednak, że nie da się tego powiedzieć z całkowitą pewnością. Istnieje pewne prawdopodobieństwo, że rzutka trafi w środek tarczy, a także niezerowe prawdopodobieństwo, że wyląduje w jakimś innym miejscu tarczy. Jeżeli klasyczna teoria — w tym przypadku prawa Newtona — mówi, że tak duży obiekt jak rzutka trafi w środek tarczy, to można bezpiecznie założyć, że faktycznie tak się stanie. W każdym razie szanse, że nie trafi (według teorii kwantowej) są tak małe, że gdyby ktoś w identyczny sposób rzucał rzutką, to prawdopodobnie do końca istnienia wszechświata nie zdarzyłby się nietrafiony rzut. Lecz w skali atomowej sprawy mają się inaczej. Rzutka wykonana z pojedynczego atomu mogłaby mieć prawdopodobieństwo równe 90 procent, że trafi w środek tarczy, 5 procent, że trafi w inne miejsce tarczy, i 5 procent, że w ogóle nie trafi w tarczę. Nie można z góry przewidzieć, który przypadek się zdarzy. Jedyne, co można stwierdzić, to fakt, że przy wielokrotnym powtarzaniu eksperymentu w dziewięćdziesięciu przypadkach na sto rzutka trafi w środek tarczy.

Mechanika kwantowa wprowadza do nauki nieunikniony element nieprzewidywalności lub przypadkowości. Einstein zdecydowanie się temu sprzeciwiał, mimo że odegrał istotną rolę w formułowaniu i rozwoju tych koncepcji. W szczególności, otrzymał Nagrodę Nobla za swój wkład w teorię kwantową. Niemniej nigdy nie zaakceptował idei, że wszechświatem rządzi przypadek; nastawienie Einsteina znalazło swój wyraz w jego słynnym stwierdzeniu, że „Bóg nie gra w kości”.

Testem poprawności teorii naukowej, jak już stwierdziliśmy uprzednio, jest jej zdolność do przewidywania wyników eksperymentów. Teoria kwantowa ogranicza nasze możliwości przewidywania. Czy oznacza to, że teoria kwantowa ogranicza naukę? Jeżeli nauka ma się rozwijać, musimy dostosować sposób jej uprawiania do wymogów, jakie dyktuje nam natura. W tym przypadku natura wymaga, abyśmy przededefiniowali to, co uważamy za przewidywanie: nie możemy dokładnie przewidzieć wyniku eksperymentu, lecz możemy wielokrotnie powtórzyć eksperyment i przeko-



Rozmyte kwantowe położenie

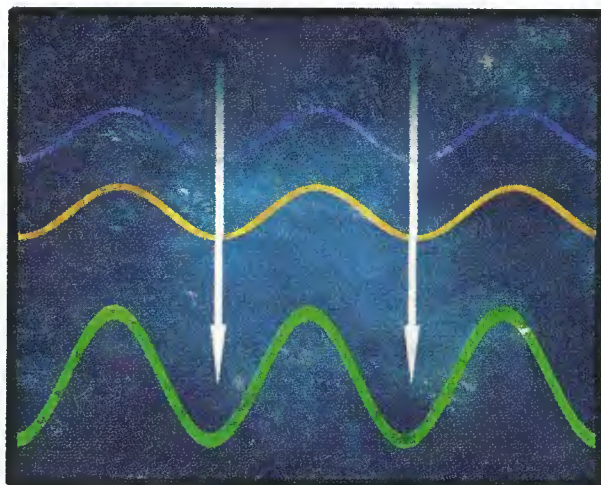
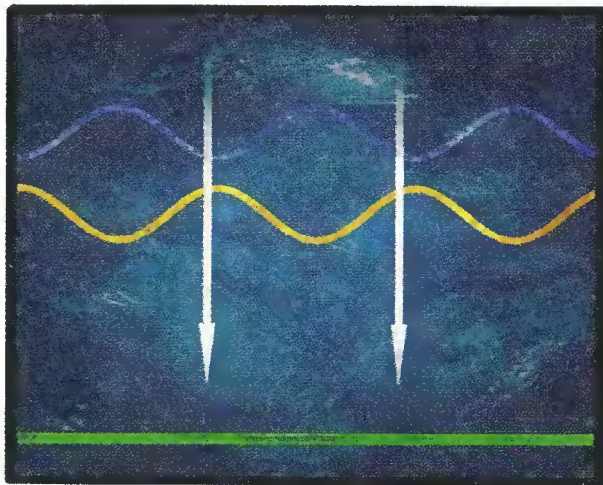
Według teorii kwantowej nie można określić położenia i prędkości obiektu z nieskończoną precyzją, ani też nie można dokładnie przewidzieć biegu przyszłych zdarzeń.

nać się, że różne możliwe wyniki mieszczą się w granicach obliczonych prawdopodobieństw. Zasada nieoznaczoności nie wymaga odrzucenia wiary w świat rządzony przez prawa fizyki. W gruncie rzeczy większość fizyków jest skłonna zaakceptować mechanikę kwantową właśnie ze względu na jej doskonałą zgodność z wynikami eksperymentów.

Jedną z najważniejszych konsekwencji zasady nieoznaczoności Heisenberga jest fakt, że cząstki pod pewnymi względami zachowują się jak fale. Jak widzieliśmy, nie mają one określonego położenia, lecz są „rozmyte”, a ich położenia określa rozkład prawdopodobieństwa. I na odwrót: światło jest wprawdzie falą, lecz kwantowa hipoteza Plancka mówi, że pod pewnymi względami światło zachowuje się, jakby było złożone z cząstek — może być emitowane lub absorbowane tylko w postaci pakietów, czyli kwantów. W istocie matematyczny formalizm teorii kwantowej nie opisuje już świata w klasycznych kategoriach wyłącznie cząstek lub wyłącznie fal. W niektórych przypadkach wygodnie jest wyobrażać sobie cząstki jako fale, w innych fale jako cząstki, lecz są to tylko mniej lub bardziej skuteczne metody wspomaganie procesów myślowych nawykłych do postrzegania świata w klasycznych kategoriach. To właśnie mają na myśli fizycy, gdy mówią o dualizmie między falami i cząstkami w mechanice kwantowej.

Jedną z istotnych konsekwencji falowej natury cząstek w mechanice kwantowej jest koncepcja interferencji cząstek, która w fizyce klasycznej dotyczyła wyłącznie zjawisk falowych. Gdy fale się spotykają, grzbiety (maksima) jednej z nich mogą się pokrywać z dolinami (minimami) drugiej i w takim przypadku mówimy, że fale drgają nie w fazie (lub w przeciwfazie). Dochodzi wtedy do wzajemnego wygaszenia obu fal. Gdy natomiast fale drgają w fazie — grzbiet spotyka się z grzbietem — wzmacniają się wzajemnie, dając silniejszą falę niż każdy ze składników z osobna. Powszechnie znanym przypadkiem interferencji fal są kolorowe refleksy światła na bańkach mydlanych, które powstają w wyniku odbicia światła od dwóch stron cienkiej warstwy wody tworzącej ściankę bańki. Białe światło składa się z fal o różnych długościach, czyli z różnych kolorów. Dla pewnych długości fali grzbiety fal odbitych od jednej strony wodnej ścianki spotykają się z dolinami fal odbitych od drugiej strony ścianki. Kolory odpowiadające tym długościom fal są zatem nieobecne w odbitej fali i w rezultacie odbite światło nie jest już białe, lecz kolorowe.

Teoria kwantowa mówi, że interferencji mogą ulegać także cząstki. Wynika to z dualizmu mechaniki kwantowej. Słynny przykład interferencji cząstek stanowi tak zwany eksperyment z dwiema szczelinami. Wyobraźmy sobie przesłonę, w której wycięto dwie wąskie, równoległe



W fazie i w przeciwfazie

Jeżeli grzbiety i doliny dwóch fal pokrywają się, powstaje silniejsza fala, lecz gdy grzbiety jednej fali pokrywają się z dolinami drugiej, fale wygaszają się wzajemnie.

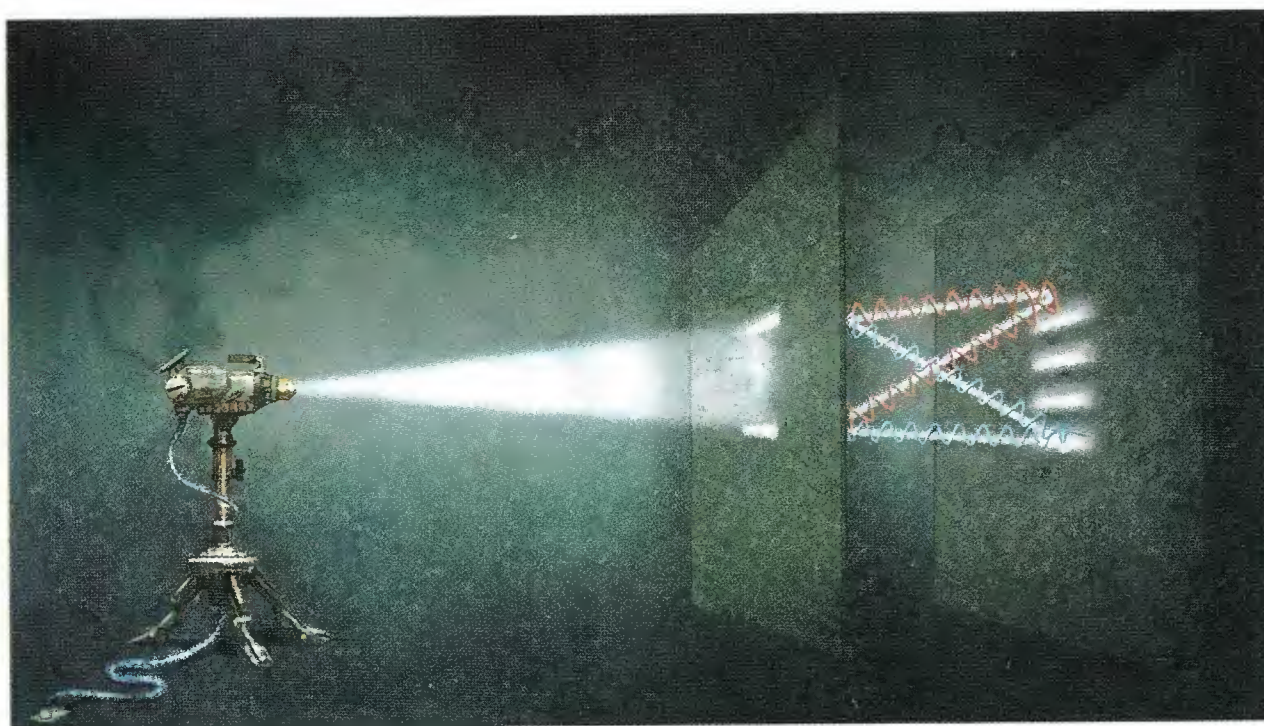
szczeliny. Zanim zaczniemy rozważać, co się stanie, gdy przez szczeliny przepuścimy cząstki, zastanówmy się, co zobaczymy, gdy szczeliny zostaną oświetlone światłem. Po jednej stronie przesłony umieszczamy źródło światła określonego koloru (czyli o określonej długości fali). Większość światła trafi w przesłonę, lecz pewna niewielka część przejdzie przez szczeliny. Po drugiej stronie przesłony umieścimy ekran. Do każdego punktu ekranu będzie docierać światło z obu szczelin, lecz odległość, jaką światło musi pokonać od źródła do ekranu, będzie na ogół inna w przypadku przejścia przez jedną ze szczelin niż w przypadku przejścia przez drugą szczelinę. A skoro odległości są różne, fale pochodzące z dwóch szczelin i spotykające się w danym punkcie ekranu na ogół nie będą w tej samej fazie. W niektórych punktach ekranu grzbiety jednej z fal spotkają się z dolinami drugiej i fale się wygaszą; w innych punktach grzbiety i doliny będą się pokrywać i fale się wzmocnią; w większości punktów dojdzie do pośredniej sytuacji. W rezultacie na ekranie powstanie charakterystyczny układ jasnych i ciemnych prążków.

Zadziwiającą konsekwencją kwantowej natury cząstek stanowi fakt, że dokładnie taki sam układ powstanie na ekranie, gdy zamiast światła pošlemy w kierunku przesłony wiązkę elektronów o określonej prędkości (zgodnie z teorią kwantową, jeżeli elektrony mają określoną prędkość, to odpowiadające im fale materii mają określoną długość). Załóżmy, że zaczynamy od strzelania elektronami w przesłonę z otwartą jedną szczeliną. Większość elektronów trafi w przesłonę i zostanie zatrzymana, lecz pewna niewielka liczba przejdzie przez szczelinę i trafi w ekran. Logiczne wydaje się

założenie, że otwarcie drugiej szczeliny po prostu zwiększy liczbę elektronów trafiających w każdy punkt na ekranie. Jeżeli jednak otworzymy drugą szczelinę, liczba elektronów trafiających w niektóre miejsca ekranu zwiększy się, a w innych zmniejszy, tak jakby elektrony interferowały, czyli zachowywały się jak fale, a nie cząstki (zob. ilustrację na stronie 91).

Wyobraźmy sobie teraz, że posyłamy elektrony pojedynczo. Czy nadal będzie zachodzić interferencja? Można by oczekiwać, że elektron przejdzie albo przez jedną szczelinę, albo przez drugą i na ekranie nie powstanie żaden interferencyjny wzór. W rzeczywistości rozkład elektronów padających na ekran nadal tworzy obraz interferencyjny, nawet gdy elektrony przechodzą przez szczeliny pojedynczo. Każdy elektron musi zatem przechodzić przez obie szczeliny równocześnie i interferować sam ze sobą!

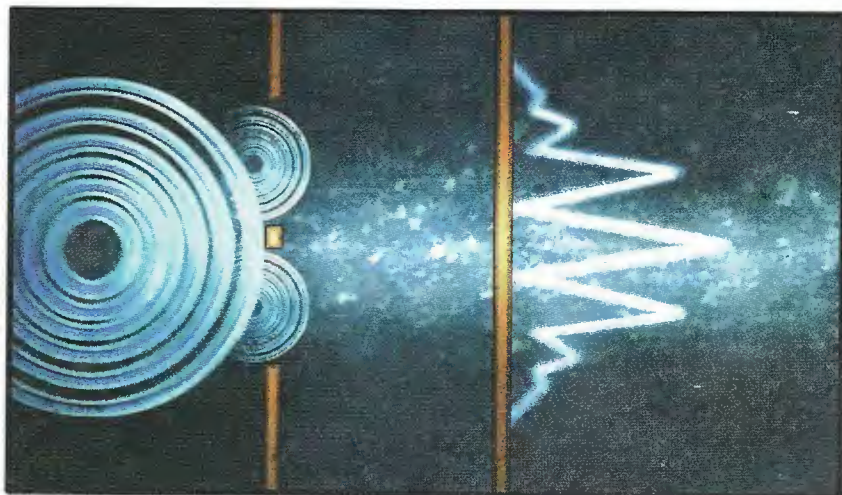
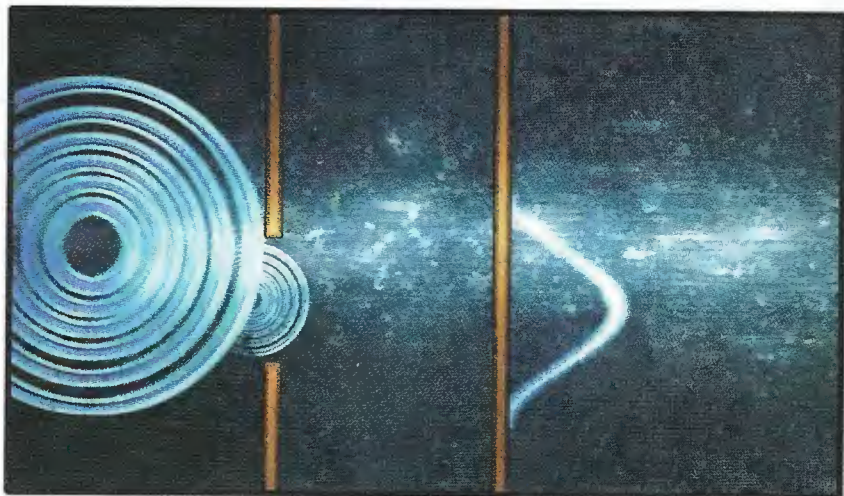
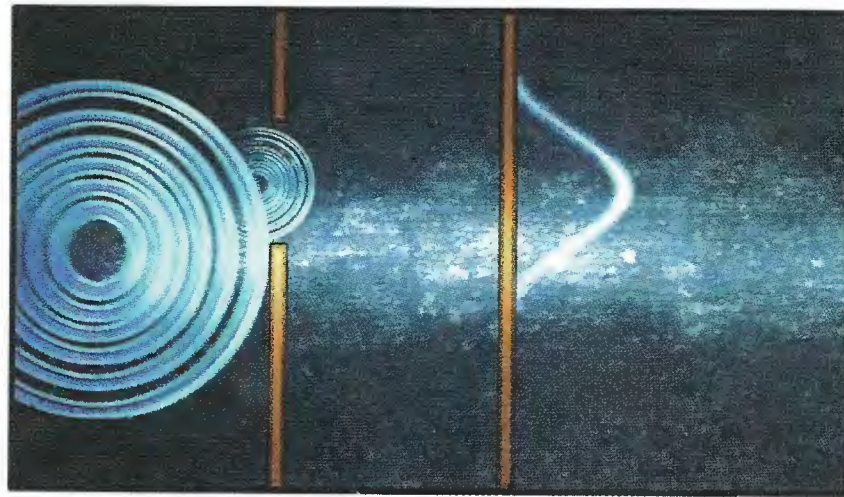
Zjawisko interferencji cząstek stanowi kluczowy element zrozumienia struktury atomów, podstawowych elementów budowy materii, wliczając nas samych. Na początku dwudziestego wieku sądzono, że atomy są podobne do układów planet krążących wokół Słońca, w których elektrony (cząstki o ujemnym ładunku elektrycznym) krążą wokół jądra znajdującego się w środku atomu i obdarzonego dodatnim ładunkiem. Przyciąga-



Drogi optyczne i interferencja

W doświadczeniu z dwiema szczelinami odległość, jaką fale muszą pokonać od górnej lub dolnej szczeliny do ekranu, zależy od wysokości danego punktu na ekranie.

W rezultacie fale wzmacniają się na pewnych wysokościach i wygaszają na innych, tworząc wzór interferencyjny.

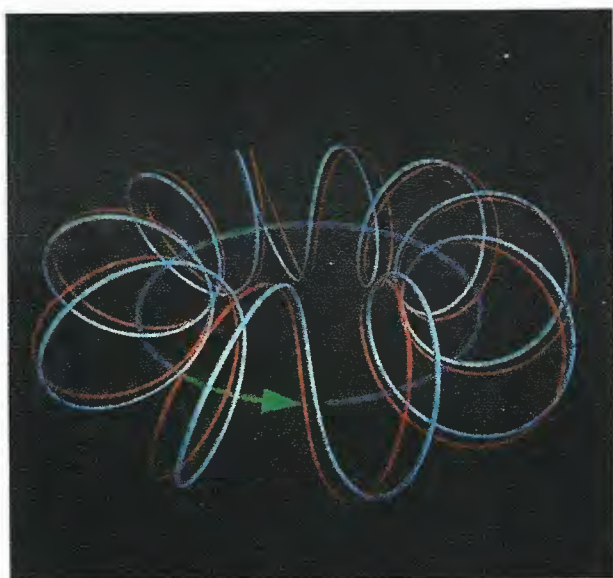


Interferencja elektronów

Dzięki interferencji rezultat przejścia wiązki elektronów przez dwie szczeliny nie odpowiada wynikowi przejścia przez każdą ze szczelin z osobna.

nie przeciwnie naładowanych cząstek byłoby odpowiedzialne za utrzymywanie elektronów na ich orbitach, podobnie jak grawitacyjne przyciąganie Słońca i planet utrzymuje planety na ich orbitach. Problem polegał na tym, że klasyczne prawa mechaniki i elektromagnetyzmu, poprzedzające teorię kwantową, przewidywały, iż krążące w taki sposób elektrony powinny emitować promieniowanie. W rezultacie elektrony traciłyby energię i krążyłyby wzdłuż coraz mniejszej orbity, aż w końcu dochodziłoby do zderzenia z jądrem. Oznaczałoby to, że atom, a zatem cała materia, powinna raptownie zapadać się do stanu o bardzo wysokiej gęstości, czego oczywiście nie obserwujemy!

W 1913 roku duński fizyk Niels Bohr znalazł częściowe rozwiązanie tego problemu. Zasugerował on, że elektrony nie mogą krążyć w dowolnej odległości od jądra, lecz tylko wzdłuż pewnych określonych orbit. Założenie, że tylko jeden lub dwa elektrony mogą krążyć wzdłuż każdej z tych określonych orbit, rozwiązało problem kolapsu, ponieważ przy pewnej liczbie zajętych wewnętrznych orbit żaden elektron nie mógłby znaleźć się bliżej jądra. Model Bohra całkiem dobrze wyjaśniał strukturę najprostszego atomu, wodoru, który ma tylko jeden elektron, lecz nie dało się go równie łatwo uogólnić, aby opisywał również bardziej złożone atomy. Co więcej, idea ograniczonego zbioru dozwolonych orbit miała wyraźnie prowizoryczny charakter. Stanowiła matematyczną sztuczkę, która spełniła



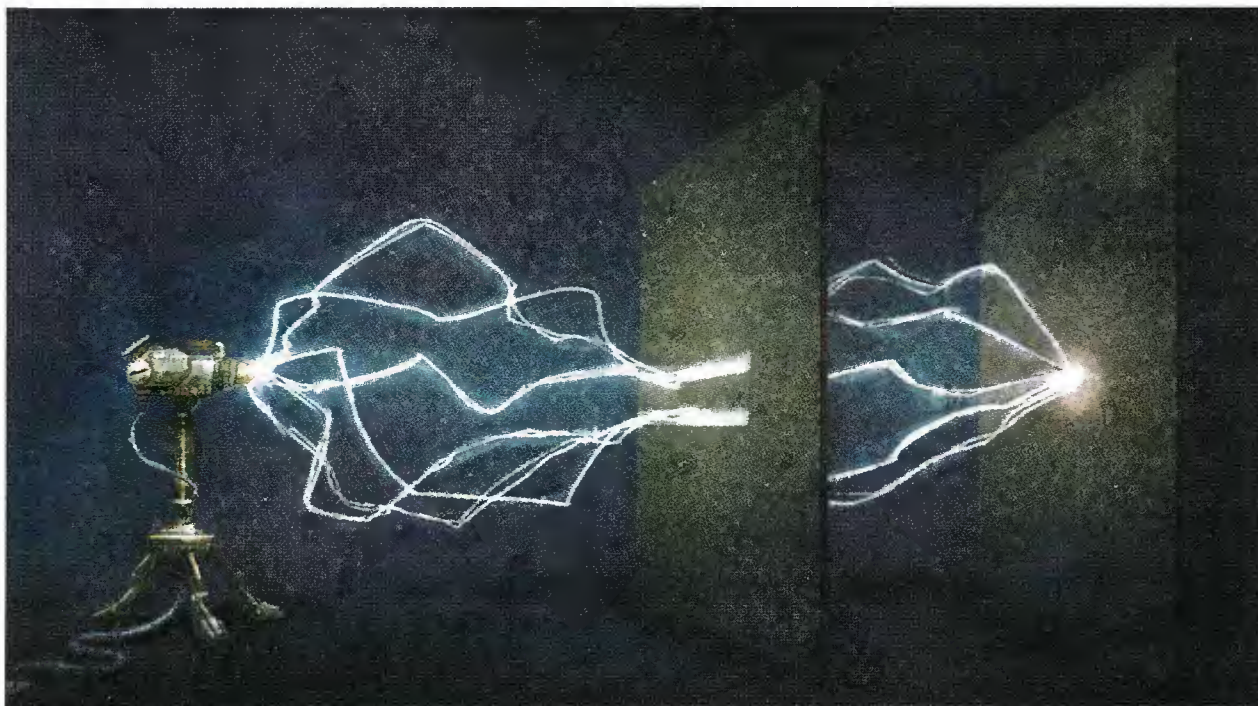
Fale na orbitach atomowych

Niels Bohr wyobrażał sobie elektrony w atomie jako fale krążące nieustannie wokół jądra. W takim modelu tylko orbity o długościach odpowiadających całkowitej liczbie długości fali mogą przeżyć destruktywną interferencję.

wprawdzie swoje zadanie, lecz nikt nie wiedział, jakie prawo przyrody reprezentowała — czy w ogóle jakiegokolwiek — i dlaczego natura miałaby zachowywać się w taki sposób. Nowa teoria, mechanika kwantowa, rozwiązała wszystkie te dylematy. W mechanice kwantowej elektron krążący wokół jądra można sobie wyobrazić jako falę, której długość zależy od prędkości ruchu elektronu. Wyobraźmy sobie falę krążącą wokół jądra w pewnej odległości, tak jak postulował Bohr. Tylko dla niektórych, określonych odległości elektronu od jądra długość orbity stanowi całkowitą wielokrotność długości fali. Fale krążące wzdłuż takich orbit za każdym okrążeniem będą miały grzbiety w tych samych miejscach, więc fale ulegną wzmocnieniu. Takie odległości odpowiadają dozwolonym orbitom w modelu Bohra. Dla orbit, których długości nie stanowią całkowitej wielokrotności długości fali, każdy grzbiet fali zostanie w trakcie kolejnych okrążeń wygaszony przez doliny. Te orbity nie będą dozwolone. W ten sposób prawo Bohra dotyczące dozwolonych i zabronionych orbit znalazło wyjaśnienie na gruncie mechaniki kwantowej.

Interesujący sposób wizualizacji dualizmu falowo-korpuskularnego stanowi idea sumy po historiach sformułowana przez amerykańskiego fizyka Richarda Feynmana. W ramach tej koncepcji cząstka nie posiada jednej historii — czyli trajektorii w czasoprzestrzeni — jaką posiadałaby na gruncie klasycznej, niekwantowej teorii, lecz porusza się z punktu A do punktu B wzdłuż każdej możliwej drogi. Każdej drodze z punktu A do B Feynman przypisuje parę liczb. Jedna z nich reprezentuje amplitudę fali, czyli jej rozmiary. Druga liczba reprezentuje fazę, czyli miejsce cyklu fali (inaczej mówiąc, czy w danym miejscu znajduje się grzbiet, dolina czy jakaś inna, pośrednia faza fali). Prawdopodobieństwo przejścia cząstki z punktu A do punktu B oblicza się przez dodanie wszystkich fal dla wszystkich dróg łączących A i B. Jeżeli weźmie się pod uwagę zbiór sąsiadujących dróg, ich fazy na ogół będą się znacznie różnić między sobą. Oznacza to, że fale stwarzane z tymi trajektoriami niemal całkowicie się wygaszą. Lecz dla pewnych określonych, sąsiadujących dróg fazy nie będą się znacznie różnić i fale skojarzone z tymi drogami nie wygaszą się. Takie drogi odpowiadają dozwolonym orbitom Bohra.

Gdy idee te zostały sformułowane w postaci konkretnych matematycznych teorii, obliczanie dozwolonych orbit w bardziej złożonych atomach okazało się dość proste i zostało nawet rozszerzone na cząsteczki chemiczne, które są przecież zbudowane z pewnej liczby atomów utrzymywanych w całości przez elektrony krążące wzdłuż orbit otaczających więcej niż jedno jądro (czyli przez wzajemne oddziaływania elektronów oraz jąder należących do różnych atomów). Struktura cząsteczek chemicznych oraz ich



Wiele dróg elektronu

W teorii kwantowej w wersji Richarda Feynmana cząstka poruszająca się od źródła do ekranu biegnie wzdłuż każdej możliwej drogi.

wzajemne oddziaływania stanowią podstawę całej chemii oraz biologii, więc mechanika kwantowa w zasadzie umożliwia przewidywanie niemal wszystkiego, co widzimy wokół siebie, w granicach określonych przez zasadę nieoznaczoności. (W praktyce nie potrafimy jednak rozwiązać równań dla żadnego układu oprócz najprostszego atomu — wodoru — który ma tylko jeden elektron; do analizy bardziej złożonych atomów oraz cząsteczek stosujemy przybliżenia oraz komputery).

Mechanika kwantowa jest jedną z najbardziej skutecznych teorii naukowych w tym sensie, że stanowi ona podstawę niemal wszystkich współczesnych nauk ścisłych oraz technologii. Wyjaśnia działanie tranzystorów i obwodów scalonych, które są podstawowymi elementami urządzeń elektronicznych, takich jak telewizory i komputery. Cała nowoczesna chemia i znaczna część współczesnej biologii opiera się na teorii kwantowej. Gravitacja oraz wielkoskalowa struktura wszechświata stanowią jedyne obszary nauk fizycznych, do których mechanika kwantowa nie została jeszcze właściwie włączona. Ogólna teoria względności Einsteina nie uwzględnia kwantowomechanicznej zasady nieoznaczoności, czego wymagałaby spójność z innymi teoriami.

Jak wspomnieliśmy w poprzednim rozdziale, wiemy już, że ogólna teoria względności musi zostać zmodyfikowana. Przewidując istnienie osobli-

wości — punktów o nieskończonej gęstości — klasyczna (czyli niekwantowa) teoria grawitacji (czyli ogólna teoria względności) przewiduje własny upadek, podobnie jak klasyczna mechanika przewidywała swój upadek, sugerując, że ciało doskonale czarne powinno promieniować nieskończoną ilość energii, a atomy powinny zapadać się do nieskończonej gęstości. Podobnie jak było w przypadku mechaniki klasycznej, mamy nadzieję wyeliminować te niemożliwe do zaakceptowania osobliwości przez przekształcenie ogólnej teorii względności w teorię kwantową, czyli w kwantową teorię grawitacji.

Jeżeli ogólna teoria względności jest błędna, to dlaczego wszystkie dotychczasowe eksperymenty ją potwierdzają? Powód, dla którego nie zauważyliśmy dotychczas żadnych odstępstw teorii od doświadczenia, jest taki, że wszystkie pola grawitacyjne, z którymi normalnie mamy do czynienia, są bardzo słabe. Lecz pola grawitacyjne powinny być bardzo silne, gdy cała materia i energia wszechświata była ściśnięta do bardzo małej objętości we wczesnym wszechświecie. W obecności takich silnych pól efekty teorii kwantowej powinny być istotne.

Wprawdzie nie mamy jeszcze kwantowej teorii grawitacji, lecz znamy pewne cechy, które powinna ona posiadać. Po pierwsze, powinna uwzględniać propozycję Feynmana, aby formułować teorię kwantową w kategoriach sumy po historiach. Po drugie, sądzimy, że każda ostateczna teoria powinna uwzględniać ideę Einsteina, zgodnie z którą pole grawitacyjne jest reprezentowane przez zakrzywioną czasoprzestrzeń: cząstki próbują podążać wzdłuż trajektorii najbardziej zbliżonej do prostej drogi w zakrzywionej przestrzeni, a skoro czasoprzestrzeń nie jest płaska, to trajektorie wydają się zakrzywione, jak gdyby pod wpływem pola grawitacyjnego. Gdy zastosujemy sumę po historiach Feynmana do Einsteinowskiej koncepcji grawitacji, analogią historii pojedynczej cząstki będzie cała zakrzywiona czasoprzestrzeń, która reprezentuje historię całego wszechświata.

W klasycznej teorii grawitacji możliwe są tylko dwie historie wszechświata: albo istniał w nieskończenie długim czasie, albo miał początek w osobliwości w pewnym skończonym czasie w przeszłości. Z powodów, które przedstawiliśmy uprzednio, sądzimy, że wszechświat nie istniał od zawsze. Jeżeli jednak miał początek, to — zgodnie z klasyczną, ogólną teorią względności — aby odkryć, które rozwiązanie równań Einsteina opisuje nasz wszechświat, musimy znać jego stan początkowy, czyli jak dokładnie wszechświat się zaczął. Bóg mógł wprawdzie początkowo zadekretować prawa natury, lecz wydaje się, że później pozostawił wszechświat samemu sobie, nie wtrącał się i pozwolił mu ewoluować zgodnie z tymi prawami. W jaki sposób wybrał początkowy stan lub konfigurację wszechświata?

Jakie były określone warunki brzegowe na początku czasu? W klasycznej teorii względności jest to poważny problem, ponieważ klasyczna teoria względności załamuje się na początku wszechświata.

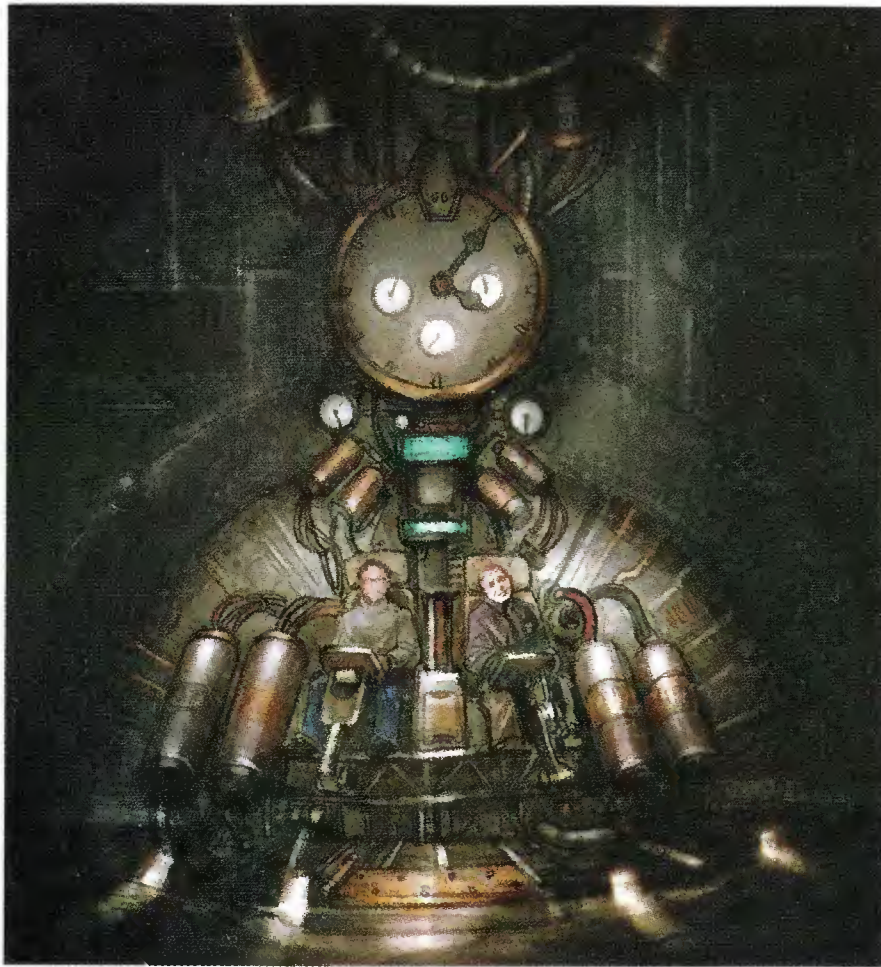
W kwantowej teorii grawitacji pojawia się pewna interesująca możliwość, która mogłaby rozwiązać powyższy problem. W kwantowej teorii czasoprzestrzeni może mieć skończone rozmiary i zarazem nie zawierać osobliwości, które tworzyłyby granice lub krawędzie. Taka czasoprzestrzeń przypominałaby powierzchnię Ziemi, lecz miałaby nie dwa, lecz cztery wymiary. Jak już wspomnieliśmy wcześniej, wyruszając w podróż w określonym kierunku na powierzchni Ziemi, nigdy nie natkniemy się na nieprzekraczalną barierę ani nie spadniemy poza krawędź, lecz w końcu dotrzemy tam, skąd wyruszyliśmy, nie wpadając po drodze do żadnej osobliwości. Jeżeli okaże się, że kwantowa teoria grawitacji dopuszcza taki model wszechświata, to nie będzie w nim osobliwości, w których załamywałyby się prawa przyrody.

Jeżeli czasoprzestrzeń nie ma granic, to nie trzeba badać jej zachowania na granicach — nie musimy znać początkowego stanu wszechświata. Nie istnieje krawędź czasoprzestrzeni, na której musielibyśmy odwoływać się do Boga lub jakiegoś nowego prawa w celu określenia warunków brzegowych dla czasoprzestrzeni. Zamiast tego możemy stwierdzić: „Warunek brzegowy dla wszechświata polega na tym, że nie ma on brzegu”. Wszechświat byłby wtedy całkowicie samowystarczalny i niezależny od niczego poza nim samym. Nie mógłby być stworzony ani zniszczony. Po prostu mógłby BYĆ. Dopóki sądziliśmy, że wszechświat miał początek, rola stwórcy wydawała się jasna, lecz jeżeli wszechświat rzeczywiście jest samowystarczalny, pozbawiony granic, krawędzi, początku i końca, to odpowiedź na pytanie, jaka jest rola stwórcy, nie jest już tak oczywista.

TUNELE CZASOPRZESTRZENNE I PODRÓŻE W CZASIE

W POPRZEDNICH ROZDZIAŁACH WIDZIELIŚMY, jak z biegiem lat zmieniały się nasze poglądy na naturę czasu. Do początków dwudziestego wieku wierzyliśmy w absolutny czas, czyli uważaliśmy, że każdemu zdarzeniu można jednoznacznie przypisać liczbę zwaną czasem, i sądziliśmy, że wszystkie dobre zegary wskażą jednakowy odcinek czasu między dwoma zdarzeniami. Lecz odkrycie, że dla każdego obserwatora prędkość światła jest taka sama niezależnie od tego, czy i jak dany obserwator się porusza, doprowadziło do powstania teorii względności, a wraz z nią do porzucenia idei jednoznacznego, absolutnego czasu. Czas zdarzeń nie może być jednoznacznie określony. Każdy obserwator posiada swoją własną miarę czasu, mierzoną jego własnym zegarem, a zegary różnych obserwatorów nie muszą się zgadzać między sobą. W ten sposób czas stał się koncepcją bardziej osobistą, zależną od obserwatora, który mierzy jego upływ. Lecz nadal był traktowany, jakby stanowił prostą linię kolejową, wzdłuż której można się poruszać tylko w jednym kierunku. Czy linia czasu może mieć pętle i rozgałęzienia, dzięki którym pociąg pędziłby wciąż do przodu, lecz mimo to wróciłby do stacji, z której wyruszył? Innymi słowy, czy możliwa jest podróż w przyszłość lub w przeszłość? Ideę tę rozwinął w *Webikule czasu* H.G. Wells, a także inni, liczni autorzy science fiction. Wiele spośród niegdysiejszych idei science fiction, na przykład łodzie podwodne i podróże na Księżyc, z czasem stało się rzeczywistością, więc jakie są perspektywy podróży w czasie?

Podróż w przyszłość jest możliwa. Teoria względności dowodzi, że można zbudować maszynę czasu, która przeniesie cię w przyszłość. Wystarczy wejść do środka, odczekać i wyjść, aby się przekonać, że znacznie więcej czasu upłynęło na Ziemi, niż upłynęło dla ciebie. Dzisiaj nie mamy jeszcze technologii, aby przedsięwziąć taką podróż, lecz jest to zadanie dla inżynierów. Wiemy, że jest to możliwe. Jedną z metod realizacji takiej maszyny opierałaby się na wykorzystaniu paradoksu bliźniąt, który opisali-



Wehikuł czasu

Autorzy w wehikule czasu

śmy w rozdziale 6. Podróż polegałaby na tym, że maszyna rozpędzałaby się do prędkości zbliżonej do prędkości światła, kontynuowałaby lot przez pewien czas (zależnie od tego, jak daleko w przyszłość chciałby się przenieść siedzący w środku podróżnik), a następnie wracałaby do punktu startu. Nie powinno nas dziwić, że maszyna czasu jest równocześnie statkiem kosmicznym*, ponieważ w teorii względności czas i przestrzeń są ze sobą związane. W każdym razie z punktu widzenia podróżnika jedyne „miejsce”, w którym spędzi on całą podróż, to wewnątrz maszyny czasu, a gdy je opuści, przekona się, że więcej czasu upłynęło na Ziemi niż na jego (także biologicznym) zegarze. Odbył podróż w przyszłość. Czy może wrócić? Czy da się stworzyć warunki niezbędne do podróży wstecz w czasie?

Pierwsza wskazówka, że prawa fizyki mogą rzeczywiście umożliwić podróż wstecz w czasie, pojawiła się w 1949 roku, gdy Kurt Gödel odkrył

* Gra słów: *spaceship*, co dosłownie oznacza „statek przestrzenny”.

nowe rozwiązanie równań Einsteina, czyli nową czasoprzestrzeń dopuszczalną przez ogólną teorię względności. Wiele różnych matematycznych modeli wszechświata spełnia równania Einsteina, lecz nie oznacza to oczywiście, że odpowiadają one wszechświatowi, w którym żyjemy. Różnią się one między innymi warunkami początkowymi lub brzegowymi. Aby się przekonać, czy modele te odpowiadają naszemu wszechświatowi, musimy przeanalizować ich fizyczne przewidywania.

Gödel był matematykiem. Sławę przyniósł mu dowód, że nie da się wykazać prawdziwości wszystkich twierdzeń nawet w tak sformalizowanej i powszechnie znanej dziedzinie jak arytmetyka. Twierdzenie o niezupełności Gödla, które w pewnym sensie jest matematycznym odpowiednikiem zasady nieoznaczoności, może stanowić równie fundamentalne ograniczenie naszych możliwości zrozumienia i przewidywania wszechświata. Gödel poznał teorię względności w Institute for Advanced Study w Princeton, gdzie on i Einstein spędzili ostatnie lata swego życia. Czasoprzestrzeń Gödla ma pewną dziwną właściwość — odkryte przez niego rozwiązanie opisuje wirujący wszechświat.

Co to znaczy, że cały wszechświat wiruje? Wirowanie oznacza ciągły obrót wokół osi, lecz czy nie wymaga to istnienia stacjonarnego punktu odniesienia? Można zadać pytanie, względem czego wiruje. Odpowiedź jest technicznie dość złożona, lecz w zasadzie oznacza, że odległa materia wiruje względem kierunków wyznaczonych przez niewielkie bąki — żyroskopy — znajdujące się we wszechświecie. Uboczny skutek wirowania wszechświata w czasoprzestrzeni Gödla polega na tym, że jeżeli ktoś wyruszy w podróż bardzo daleko od Ziemi, a następnie wróci, to możliwy jest powrót w czasie poprzedzającym moment startu.

Odkrycie, że równania dopuszczają taką możliwość, niezmiernie zirytoowało Einsteina, który sądził, że ogólna teoria względności nie pozwala na podróże w czasie. Rozwiązanie znalezione przez Gödla spełnia wprawdzie równania Einsteina, lecz nie opisuje naszego wszechświata, ponieważ obserwacje wskazują, że nasz wszechświat nie wiruje. W każdym razie nie wiruje w zauważalny sposób. Z kolei wszechświat Gödla nie rozszerza się, w odróżnieniu od naszego wszechświata. Tymczasem naukowcy odkryli inne rozwiązania równań ogólnej teorii względności, które także dopuszczają podróże wstecz w czasie. Obserwacje mikrofalowego promieniowania tła oraz rozpowszechnienia takich pierwiastków jak wodór i hel wskazują jednak, że wczesny wszechświat nie był zakrzywiony w takim stopniu, aby umożliwić podróże wstecz w czasie. Ten sam wniosek można wyprowadzić, jeżeli założy się hipotezę wszechświata bez brzegów. Powstaje zatem pytanie: Jeżeli wszechświat zaczął się bez zakrzywienia niezbędnego

do podróży w czasie, to czy możliwe jest późniejsze, lokalne zakrzywienie czasoprzestrzeni, które jednak dopuszczaloby takie podróże?

Czas i przestrzeń są ze sobą związane, więc nie ma nic dziwnego w tym, że kwestia podróży w czasie jest ściśle powiązana z pytaniem, czy możliwa jest podróż z prędkością większą od prędkości światła. Nietrudno zauważyć, dlaczego podróż wstecz w czasie implikuje podróż z nadświatelną prędkością: aby podróżować z nieograniczoną prędkością, wystarczy zmniejszyć czas podróży, a do tego celu wystarczy ostatni odcinek podróży przemierzyć wstecz w czasie! Jak zobaczymy, taka sama zależność obowiązuje w drugą stronę: jeżeli potrafisz podróżować z nieograniczoną prędkością, to możesz również podróżować wstecz w czasie. Jedno nie może być możliwe bez drugiego.

Kwestia podróży szybciej od światła stanowi zasadniczy problem dla pisarzy science fiction. Zgodnie z ogólną teorią względności, jeżeli wyślemy statek kosmiczny do najbliższej gwiazdy, Proximy Centauri, która znajduje się w odległości około czterech lat świetlnych, to dopiero po niemal ośmiu latach możemy się spodziewać powrotu podróżników i wieści o tym, co znaleźli. A gdyby ekspedycja miała dotrzeć do centrum Galaktyki, to podróż tam i z powrotem zajmie co najmniej sto tysięcy lat. Niezbyt zachęcająca perspektywa do tworzenia prozy o galaktycznych wojnach! Teoria względności oferuje wprawdzie pewnego rodzaju nagrodę pocieszenia, gdyż — w świetle naszej dyskusji z rozdziału 6 na temat paradoksu bliźniąt — wyprawa może się wydawać znacznie krótsza z punktu widzenia podróżników niż tych, którzy pozostali na Ziemi. Lecz powrót na planetę po kilkuletniej podróży nie byłby chyba zbyt radosny dla podróżnika, który przekona się, że wszyscy, których pożegnał przed wyruszeniem na wyprawę, są martwi od wielu tysięcy lat. Aby pozyskać zainteresowanie czytelników, autorzy powieści science fiction muszą zakładać, że któregoś dnia odkryjemy, jak podróżować szybciej od światła. Większość z nich nie zdaje sobie jednak sprawy, że każdy, kto potrafi podróżować szybciej od światła, potrafi również podróżować wstecz w czasie, co wynika wprost z teorii względności, a ilustruje poniższy wierszyk:

*There was a young lady of Wight
Who traveled much faster than light.
She departed one day,
In a relative way,
And arrived on the previous night.*

*Pewna młoda dama z wyspy Wight,
podróżując szybciej od światła,
gnana tęsknotą
wyruszyła pewnego ranka
i do swego kochanka
przybyła poprzedniej nocy.*

Klucz do zrozumienia tego związku stanowi teoria względności, która mówi, że nie tylko nie istnieje jednoznaczna miara czasu, wspólna dla wszystkich obserwatorów, lecz w pewnych warunkach obserwatorzy ci nie będą zgodni nawet co do kolejności zdarzeń. W szczególności, jeżeli dwa zdarzenia, A i B, zaszły tak daleko od siebie w przestrzeni, że rakieta musiałaby przekroczyć prędkość światła, aby dostać się od zdarzenia A do B, to dwaj obserwatorzy poruszający się z różnymi prędkościami mogą się różnić co do tego, czy zdarzenie A zaszło wcześniej niż B, czy B wcześniej niż A. Załóżmy na przykład, że zdarzeniem A jest finał w biegu na sto metrów na igrzyskach olimpijskich w 2012 roku, natomiast zdarzeniem B jest rozpoczęcie 100 004 posiedzenia Kongresu Proximy Centauri. Przypuśćmy, że dla obserwatora na Ziemi zdarzenie B zaszło później niż A — powiedzmy, że B zaszło rok później, w 2013 roku według ziemskiego czasu. Ziemię od Proximy Centauri dzieli około czterech lat świetlnych, więc zdarzenia A i B spełniają powyższe kryterium — A zaszło wprawdzie wcześniej, lecz podróż od zdarzenia A do B musiałaby się odbywać szybciej od światła. Dla obserwatora na Proximie Centauri, oddalającego się od Ziemi z prędkością bliską prędkości światła, kolejność zdarzeń byłaby odwrotna: zdarzenie B zaszłoby przed zdarzeniem A. Obserwator ten stwierdziłby, że można się dostać od zdarzenia B do A, jeżeli przekroczy się prędkość światła. W istocie, jeżeli poruszałby się naprawdę szybko, mógłby dotrzeć z A na Proximę Centauri przed wyścigiem i obstawić wynik u bukmachera, mając pełną wiedzę o przebiegu zawodów!

Z przekraczaniem bariery prędkości światła wiąże się jednak pewien problem. Teoria względności mówi, że moc potrzebna do rozpędzania rakiety jest tym większa, im prędkość rakiety jest bliższa prędkości światła. Mamy na to eksperymentalne dowody, wprawdzie nie ze statkami kosmicznymi, lecz z cząstkami elementarnymi rozpędzanymi w akceleratorach, w takich ośrodkach jak Fermilab w USA lub CERN w Europie. Potrafimy rozpędzać te cząstki do 99,99 procent prędkości światła, lecz żadna moc nie jest w stanie zmusić ich do poruszania się szybciej od światła. Podobnie będzie ze statkami kosmicznymi: niezależnie od mocy silników nie będą one w stanie przyspieszyć powyżej prędkości światła. A skoro podróże wstecz w czasie są możliwe tylko wtedy, gdy możliwe są podróże z prędkością większą od prędkości światła, to wydaje się, że jedne i drugie są wykluczone.

Być może istnieje jednak pewne wyjście z tej sytuacji, jeżeli da się zakrzywić czasoprzestrzeń w taki sposób, aby stworzyć skrót między punktami A i B. Jedną z możliwości polega na stworzeniu tunelu czasoprzestrzen-



Tunel czasoprzestrzenny

Jeżeli tunele czasoprzestrzenne istnieją, mogą stanowić skróty między odległymi punktami w przestrzeni.

nego między A i B. Jak sugeruje nazwa*, tunel czasoprzestrzenny to cienka rura, która łączy dwa niemal płaskie obszary czasoprzestrzeni. Dla kogoś znajdującego się u stóp wysokiego łańcucha gór jedyny sposób na przedostanie się na drugą stronę polega na wspinaniu się na przełęcz, a następnie na zejściu w dolinę po drugiej stronie — chyba że w skale został wydrążony poziomy tunel łączący obie doliny. Wyobraźmy sobie taki tunel prowadzący z okolic Układu Słonecznego w pobliżu Proximy Centauri. Wzdłuż tunelu odległość mogłaby wynosić zaledwie kilka milionów kilometrów, mimo że w zwykłej przestrzeni Ziemia i Proxima Centauri są oddalone o czterdzieści milionów milionów kilometrów. Gdybyśmy przeszli przez tunel wyniki biegu na sto metrów, miałyby mnóstwo czasu na dotarcie do celu przed otwarciem Kongresu. Ale wtedy obserwator poruszający się w kierunku Ziemi mógłby znaleźć inny tunel, który umożliwiłby mu przedostanie się z otwarcia Kongresu z powrotem na Ziemię przed początkiem wyścigu. Na tej zasadzie tunele czasoprzestrzenne, podobnie jak inne możliwe formy podróży szybciej od światła, pozwalałyby także na podróże wstecz w czasie.

Idea tuneli czasoprzestrzennych łączących różne obszary czasoprzestrzeni nie jest wynalazkiem pisarzy science fiction, lecz pochodzi z całkiem poważnego źródła. W 1935 roku Einstein i Nathan Rosen napisali artykuł,

* W oryginale: *wormhole*, co dosłownie oznacza „otwór pozostawiony przez robaka”.

w którym udowodnili, że ogólna teoria względności dopuszcza tak zwane mosty, które obecnie noszą nazwę tuneli czasoprzestrzennych. Mosty Einsteina-Rosena nie istnieją na tyle długo, aby umożliwić statkom kosmicznym korzystanie z nich — tunel zapadłby się, a statek wpadłby w osobliwość. Nieco później pojawiła się jednak sugestia, że zaawansowana cywilizacja mogłaby utrzymać otwarty tunel czasoprzestrzenny. Aby tego dokonać, czyli zakrzywić czasoprzestrzeń w sposób, który umożliwiłby podróże kosmiczne, potrzebny jest obszar czasoprzestrzeni o ujemnym zakrzywieniu, coś w rodzaju powierzchni siodła, lecz w czterech wymiarach. Zwykła materia, dla której gęstość energii jest dodatnia, nadaje czasoprzestrzeni dodatnią krzywiznę, na podobieństwo powierzchni kuli. Aby zakrzywić czasoprzestrzeń w sposób umożliwiający podróż wstecz w czasie, potrzebna jest zatem materia o ujemnej gęstości energii.

Ujemna gęstość energii? Co to znaczy? Energia to trochę jak pieniądze — jeżeli mamy dodatnie saldo, możemy ją rozdawać na różne sposoby, ale klasyczne prawa obowiązujące jeszcze sto lat temu nie dopuszczały możliwości debetu na rachunku. Prawa klasycznej fizyki wykluczały ujemną gęstość energii, a wraz z nią wykluczały także podróże wstecz w czasie. Jak stwierdziliśmy w poprzednich rozdziałach, klasyczne prawa zostały jednak zastąpione przez prawa kwantowe, oparte na zasadzie nieoznaczoności. Prawa kwantowe są nieco bardziej liberalne i dopuszczają debety na niektórych rachunkach, pod warunkiem że całkowite saldo jest dodatnie. Inaczej mówiąc, teoria kwantowa dopuszcza ujemną gęstość energii w niektórych miejscach, pod warunkiem że w innych miejscach gęstość energii jest dodatnia i kompensuje ubytki w taki sposób, że ogólny bilans jest dodatni. Mamy powody, aby uważać, że czasoprzestrzeń może się zarówno kurczyć, jak i rozszerzać w taki sposób, że umożliwi podróże w czasie.

Zgodnie z teorią sum po historiach Feynmana, w skali pojedynczych cząstek podróże wstecz w czasie nie są niczym nadzwyczajnym. W teorii Feynmana zwykła cząstka poruszająca się w przód w czasie jest równoważna antycząstce poruszającej się wstecz w czasie. Matematyczny formalizm teorii Feynmana traktuje proces kreacji oraz wzajemnej anihilacji obu elementów pary cząstka/antycząstka jako pojedynczą cząstkę, która porusza się w zamkniętej pętli w czasoprzestrzeni. Aby zrozumieć ten proces, wyobraźmy go sobie w tradycyjny sposób. W pewnym momencie, nazwijmy go chwilą A, pojawia się para cząstka/antycząstka. Obie poruszają się w przód w czasie. W pewnym późniejszym momencie, nazwijmy go chwilą B, spotykają się ponownie i wzajemnie anihilują. Ani przed chwilą A, ani po chwili B żadna z nich nie istnieje. Według Feynmana możemy na ten proces spojrzeć w nieco inny sposób. W chwili A powstaje pojedyncza cząstka.

Porusza się w przód w czasie do chwili B, a następnie wraca wstecz w czasie do A. Zamiast cząstki i antycząstki poruszających się razem w przód w czasie mamy tylko jeden obiekt poruszający się w „pętli” od A do B i z powrotem. Gdy obiekt porusza się w przód w czasie (od A do B), jest nazywany cząstką. Gdy porusza się wstecz w czasie (od B do A), wygląda jak antycząstka poruszająca się w przód w czasie.

Taka podróż w czasie może wywołać obserwowalne efekty. Przypuśćmy, że jeden obiekt z pary cząstka/antycząstka (na przykład antycząstka) wpadnie do czarnej dziury, pozostawiając drugi obiekt bez partnera, z którym mógłby anihilować. Osamotniona cząstka najczęściej także wpada do czarnej dziury, lecz może również uciec z jej sąsiedztwa. W takim przypadku dla oddalonego obserwatora cząstka taka będzie sprawiać wrażenie, jakby została wyemitowana przez czarną dziurę. Mechanizm emisji promieniowania przez czarne dziury można także przedstawić w nieco odmienny, ale równoważny, intuicyjny sposób. Tę cząstkę, która wpadła do czarnej dziury (powiedzmy, że była to antycząstka), można postrzegać jako cząstkę podróżującą od czarnej dziury wstecz w czasie. Gdy dociera ona do punktu, w którym pojawiła się para cząstka/antycząstka, biegnąca wstecz w czasie cząstka ulega rozproszeniu przez pole grawitacyjne czarnej dziury i staje się cząstką poruszającą się w przód w czasie i uciekającą z czarnej dziury. Jeżeli natomiast do czarnej dziury wpadła cząstka, można postrzegać ją jako antycząstkę poruszającą się wstecz w czasie i wylaniającą się z czarnej dziury. W ten sposób promieniowanie czarnych dziur dowodzi, że w mikroskopowej skali teoria kwantowa dopuszcza podróże wstecz w czasie.

Możemy zadać pytanie, czy teoria kwantowa umożliwi nam zbudowanie maszyny czasu, gdy poziom naszej wiedzy będzie wystarczająco wysoki, aby pokonać bariery technologiczne. Na pierwszy rzut oka wydaje się, że powinno to być możliwe. Suma po historiach Feynmana powinna obejmować wszystkie historie, także takie, w których czasoprzestrzeń jest zakrzywiona w stopniu umożliwiającym podróże wstecz w czasie. Lecz nawet jeżeli znane nam prawa fizyki nie wykluczają podróży w czasie, istnieją pewne powody do kwestionowania tej możliwości.

Jedno z pytań brzmi następująco: Jeżeli podróże wstecz w czasie są możliwe, to dlaczego nikt z przyszłości nie wrócił, aby nam powiedzieć, jak to się robi? Mogą wprawdzie istnieć poważne powody, aby nie ujawniać sekretów podróży w czasie na naszym obecnym, prymitywnym poziomie rozwoju, lecz — jeżeli tylko ludzka natura nie uległa radykalnej zmianie — trudno uwierzyć, że żaden gość z przyszłości nie puściłby pary z ust. Zwolennicy UFO mogą oczywiście twierdzić, że odwiedziny UFO stano-



Antycząstka à la Feynman

Antycząstka może być uważana za cząstkę poruszającą się wstecz w czasie.
 Wirtualna para cząstka/antycząstka może zatem być uważana za cząstkę poruszającą się w zamkniętej pętli w czasoprzestrzeni.

wią dowód, iż jesteśmy odwiedzani przez obce istoty lub przez ludzi z naszej przyszłości (biorąc pod uwagę odległości do gwiazd, obcy musieliby poruszać się szybciej od światła, aby dostać się tutaj w rozsądnym czasie, więc powyższe dwie możliwości mogą w istocie być równoważne). Jeden z możliwych powodów nieobecności gości z przeszłości może polegać na tym, że przeszłość jest ustalona — w tym sensie, że już ją zaobserwowaliśmy i stwierdziliśmy, że nie ma ona zakrzywienia umożliwiającego podróż wstecz z przyszłości. Z drugiej strony, przyszłość jest nieznaną i otwartą, więc równie dobrze może mieć niezbędne zakrzywienie. W takiej sytuacji jakakolwiek podróż w czasie byłaby ograniczona do przyszłości. Nie ma żadnej szansy, aby w teraźniejszości mógł się pojawić kapitan Kirk i statek „Enterprise”.

To może stanowić wyjaśnienie, dlaczego nie zostaliśmy jeszcze zadeptani przez turystów z przyszłości. Jeżeli jednak podróże wstecz w czasie są możliwe, to pojawia się wątpliwość zupełnie innego rodzaju: dlaczego nie mamy problemów z historią. Załóżmy na przykład, że ktoś wrócił z przyszłości i ujawnił nazistom szczegóły budowy bomby atomowej lub zabił twojego prapradziadka, zanim prapradziadek zdołał spłodzić swoje dzieci. Istnieje wiele wersji tego paradoksu, lecz wszystkie one są w zasadzie równoważne: gdybyśmy mieli swobodę zmieniania przeszłości, popadalibyśmy w sprzeczności.

Wydaje się, że istnieją dwa możliwe rozwiązania paradoksów związanych z podróżami w czasie. Pierwsze można nazwać hipotezą spójnych historii. Mówi ono, że nawet gdy czasoprzestrzeń jest zakrzywiona, dzięki czemu podróże w przeszłość są możliwe, wszystko, co dzieje się w czasoprzestrzeni, musi stanowić spójne rozwiązanie praw przyrody. Innymi słowy, zgodnie z tym punktem widzenia, nikt nie mógłby przenieść się wstecz w czasie, jeżeli historia już nie wskazuje, że faktycznie tam był i ani nie zabił swojego prapradziadka, ani nie popełnił żadnego innego czynu powodującego sprzeczność w biegu historii, która ostatecznie doprowadziła go do jego obecnej sytuacji w teraźniejszości. Co więcej, nie mógłby zmieniać zapisanej historii — mógłby jedynie ją naśladować. W ramach tej hipotezy przeszłość i przyszłość są zdeterminowane: nie mamy wolnej woli i nie możemy robić, co chcemy.

Można oczywiście powiedzieć, że wolna wola i tak jest iluzją. Jeżeli rzeczywiście istnieje kompletna teoria, która rządzi wszystkim, to zapewne determinuje ona także nasze działania. Obejmuje ona jednak pewien element przypadku wynikający z efektów mechaniki kwantowej i nawet tak złożony organizm jak człowiek nie potrafi obliczyć jej przewidywań, więc równie dobrze można powiedzieć, że człowiek posiada wolną wolę, ponieważ nie potrafi przewidzieć przyszłości. Jeżeli jednak człowiek wyrusza

w kosmos, a następnie wraca wcześniej, niż wyruszył, będziemy mogli przewidzieć jego przyszłe działania, ponieważ będą one częścią zapisanej historii. W takiej sytuacji podróżnik w czasie nie będzie miał wolnej woli w żadnym znaczeniu tego pojęcia.

Drugi możliwy sposób rozwiązania paradoksów podróży w czasie można nazwać hipotezą alternatywnych historii. Gdy podróżnicy w czasie udają się w przeszłość, uruchamiają alternatywne ciągi wydarzeń, które różnią się od zapisanej historii. W ten sposób mogą działać według swej woli, bez ograniczeń wynikających ze spójności z uprzednio zapisaną historią. Steven Spielberg oparł na tej koncepcji swoją trylogię *Powrót do przyszłości*: Marty McFly mógł wrócić do przeszłości i zmienić przebieg załotów swoich rodziców na bardziej zadowolającą wersję.

Hipoteza alternatywnych historii przypomina trochę sformułowanie teorii kwantowej w postaci sumy po historiach Richarda Feynmana opisanej w rozdziale 9. Wszechświat nie miałby w niej jednej historii; wręcz przeciwnie — miałby wszystkie możliwe historie, każdą z określonym prawdopodobieństwem. Wydaje się jednak, że jest istotna różnica między propozycją Feynmana a hipotezą alternatywnych historii. W sumie Feynmana każda historia zawiera kompletną czasoprzestrzeń oraz wszystko, co się w niej znajduje. Czasoprzestrzeń może być tak zakrzywiona, że umożliwi podróż rakieta w przeszłość. Rakieta będzie jednak zmuszona pozostać w tej samej czasoprzestrzeni, a zatem i w tej samej historii, która będzie musiała być spójna. Wydaje się zatem, że propozycja sum po historiach Feynmana jest zgodna z hipotezą spójnych historii, a nie z ideą alternatywnych historii.

Unikniemy tych problemów, jeżeli przyjmiemy tak zwaną hipotezę ochrony chronologii, która stwierdza, że prawa fizyki konspirują w taki sposób, aby uniemożliwić makroskopowym obiektom przenoszenie informacji w przeszłość. Hipoteza ta nie została udowodniona, lecz istnieją pewne przesłanki na rzecz jej prawdziwości. Jeżeli czasoprzestrzeń jest dostatecznie zakrzywiona, aby umożliwić podróż w przeszłość, obliczenia oparte na teorii kwantowej wskazują, że pary cząstka/antycząstka krążące wzdłuż zamkniętych pętli wytwarzają na tyle duże gęstości energii, że nadają czasoprzestrzeni dodatnie zakrzywienie kompensujące ujemne zakrzywienie i w rezultacie efektywnie uniemożliwiają podróż w czasie. Na razie nie mamy jednak całkowitej pewności, więc kwestia podróży w czasie pozostaje nadal otwarta. Nie radzimy jednak nikomu zakładać się, jak zostanie rozstrzygnięta. Jedna ze stron zakładu może mieć przewagę w postaci dostępu do informacji z przyszłości.

SIŁY PRZYRODY I UNIFIKACJA FIZYKI

JAK STWIERDZILIŚMY W ROZDZIALE 3, bardzo trudno byłoby za jednym zamachem skonstruować kompletną, jednolitą (zunifikowaną) teorię wszystkiego obejmującą całość wszechświata. Zamiast tego nauka odkrywała cząstkowe teorie opisujące ograniczone zbiory zjawisk i zaniedbujące inne efekty lub w najlepszym razie uwzględniające je w sposób przybliżony, przez podanie wartości liczbowych pewnych wielkości fizycznych. Prawa fizyki w obecnie znanej postaci obejmują wiele takich liczb — na przykład ładunek elektronu lub stosunek mas protonu i elektronu — których nie potrafimy, przynajmniej na razie, wyprowadzić z teorii. Musimy wyznaczać je na podstawie obserwacji i wstawiać ręcznie do równań. Niektórzy naukowcy nazywają te liczby fundamentalnymi stałymi fizycznymi, inni parametrami teorii, a jeszcze inni używają znacznie bardziej dosadnych określeń*.

Niezależnie od nazwy czy statusu tych wielkości godny uwagi jest fakt, że ich liczbowe wartości wydają się bardzo precyzyjnie dostrojone, w taki sposób, aby umożliwić rozwój życia. Gdyby na przykład ładunek elektronu był tylko nieznacznie większy lub mniejszy od aktualnej wartości, zaburzyłby równowagę sił elektromagnetycznych i grawitacyjnych w gwiazdach. W rezultacie gwiazdy albo nie mogłyby spalać wodoru i helu, albo nie eksplodowałyby. Tak czy inaczej, życie nie mogłoby zaistnieć. Mamy nadzieję, że ostatecznie odkryjemy kompletną, spójną, jednolitą teorię, która obejmie wszystkie te cząstkowe, przybliżone teorie i nie będzie wymagać dopasowywania liczbowych wartości różnych wielkości fizycznych — takich jak ładunek elektronu — do wyników obserwacji.

Poszukiwanie takiej teorii jest znane jako unifikacja fizyki. Einstein spędził znaczną część swojego życia na bezowocnych poszukiwaniach jednoli-

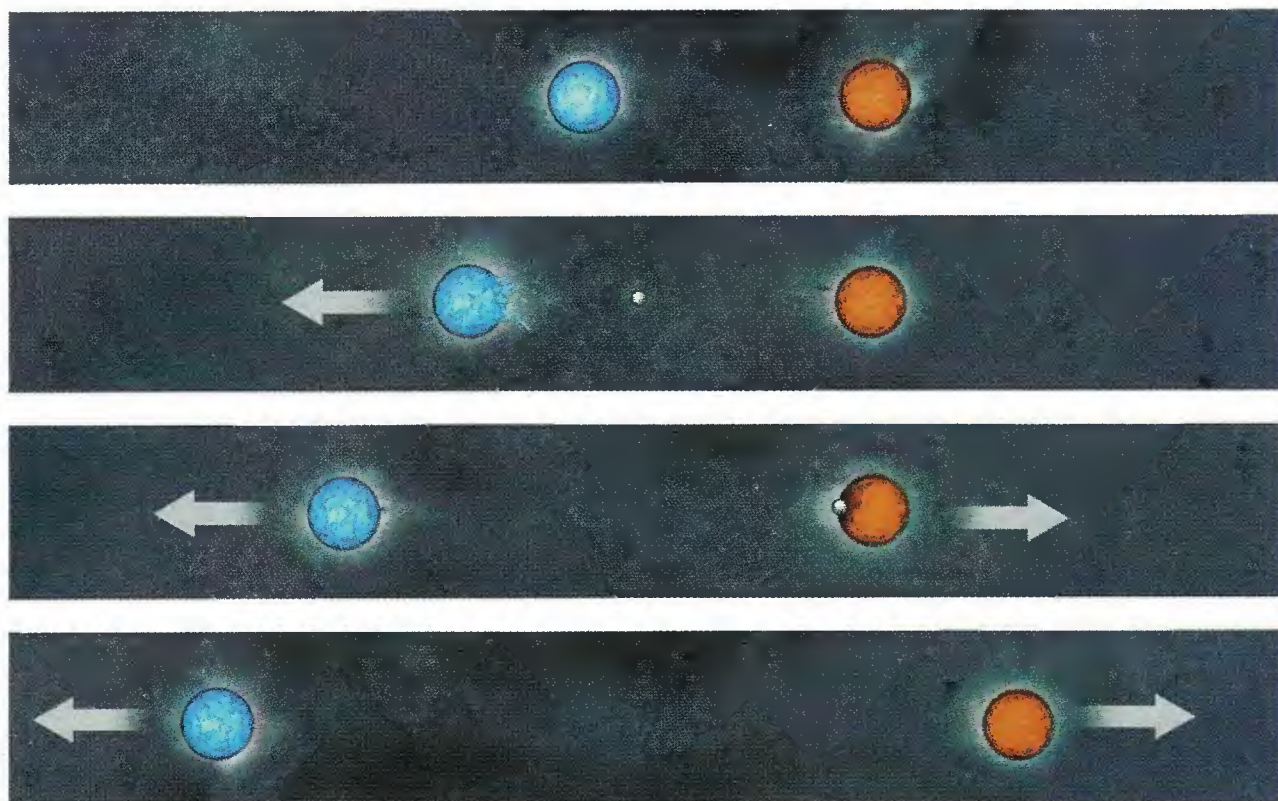
* W oryginale: *fudge factors*, co w wolnym tłumaczeniu oznacza „prowizoryczne czynniki”.

tej, zunifikowanej teorii, lecz nie był to najlepszy okres do takich badań — znane były cząstkowe teorie opisujące grawitację oraz elektromagnetyzm, lecz bardzo niewiele wiedziano wówczas o oddziaływaniach jądrowych. Co więcej, jak wspomnieliśmy w rozdziale 9, Einstein nie uznawał niektórych aspektów mechaniki kwantowej. Obecnie wydaje się, że zasada nieoznaczoności stanowi podstawową cechę wszechświata, w którym żyjemy. Jednolita teoria fizyczna musi zatem w taki czy inny sposób uwzględniać tę zasadę.

Obecnie perspektywy odkrycia takiej teorii wydają się o wiele lepsze, ponieważ znacznie więcej wiemy na temat wszechświata. Nie powinniśmy jednak ulegać nadmiernemu optymizmowi, gdyż mieliśmy już kilka fałstartów! Na przykład na początku dwudziestego wieku wydawało się, że wszystko da się wyjaśnić w kategoriach właściwości ciągłej materii, takich jak elastyczność i przewodnictwo cieplne, lecz odkrycie struktury atomowej oraz zasady nieoznaczoności położyło zdecydowany kres tym nadziejom. W 1928 roku Max Born z uniwersytetu w Getyndze, zdobywca Nagrody Nobla z fizyki, powiedział: „Fizyka w takiej postaci, w jakiej ją znamy, będzie skończona w sześć miesięcy”. Jego opinia była oparta na niedawnym odkryciu (przez Diraca) równania rządzącego zachowaniem elektronu. Wszyscy spodziewali się, że podobne równanie rzędzi protonem, a ponieważ były to jedyne dwie cząstki elementarne znane w owym czasie, wydawało się, że nastąpi koniec fizyki teoretycznej. Odkrycie neutronu oraz sił jądrowych położyło kres także i tym oczekiwaniom. To powiedziawszy, możemy jednak ostrożnie stwierdzić, iż istnieją przesłanki do umiarkowanego optymizmu — niewykluczone, że jesteśmy bliscy zakończenia poszukiwań ostatecznych praw fizyki.

W mechanice kwantowej siły, czyli oddziaływania między cząstkami materii, są przenoszone przez cząstki — nośniki oddziaływań. Odbywa się to w ten sposób, że cząstka materii — na przykład elektron lub kwark — emituje cząstkę będącą nośnikiem siły. Odrzut związany z tą emisją zmienia prędkość cząstki materii na takiej samej zasadzie jak odrzut armaty po wystrzale. Cząstka przenosząca oddziaływanie zderza się następnie z inną cząstką materii i zostaje pochłonięta, zmieniając także i jej prędkość. Efekt netto procesu emisji i absorpcji jest taki sam, jakby między obiema cząstkami materii działała siła.

Każda siła jest przenoszona przez inny nośnik. Jeżeli nośnik ma dużą masę, to jego produkcja oraz wymiana na dużą odległość jest trudna, zatem przenoszona przezeń siła ma odpowiednio krótki zasięg. Z drugiej strony, jeżeli nośnik oddziaływania nie ma masy własnej, siła ma duży zasięg. Cząstki przenoszące oddziaływania są nazywane cząstkami wirtual-



Wymiana cząstek

Zgodnie z teorią kwantową siły powstają w wyniku wymiany cząstek — nośników oddziaływań.

nymi, ponieważ — w odróżnieniu od realnych cząstek — nie mogą być bezpośrednio wykryte przez detektor cząstek. Wiemy jednak, że istnieją, ponieważ wywierają mierzalne efekty — są odpowiedzialne za siły działające między cząstkami materii.

Cząstki będące nośnikami oddziaływań można podzielić na cztery kategorie. Należy podkreślić, że podział ten jest wygodny z punktu widzenia konstrukcji cząstkowych teorii fizycznych, lecz niekoniecznie odzwierciedla jakąś głębszą symetrię przyrody. Większość fizyków ma nadzieję, że w ramach jednolitej teorii wszystkie cztery siły staną się jedynie różnymi aspektami jednego oddziaływania. W gruncie rzeczy wielu fizyków stwierdziłoby zapewne, że jest to główny cel współczesnej fizyki.

Pierwszą kategorię stanowi siła grawitacji. Jest to uniwersalna siła w tym sensie, że każda cząstka odczuwa siłę grawitacji zależną od jej masy lub energii. Grawitacyjne przyciąganie jest wywołane przez wymianę wirtualnych cząstek zwanych grawitonami. Grawitacja jest zdecydowanie najslabszą z czterech sił przyrody — jest tak słaba, że nawet nie zauważylibyśmy jej działania, gdyby nie dwie szczególne cechy: działa na bardzo duże odległości i zawsze ma charakter przyciągający. Oznacza to, że bar-

dzo słabe oddziaływania grawitacyjne pojedynczych cząstek należących do dwóch dużych ciał, na przykład takich jak Ziemia i Słońce, mogą się sumować i dawać w efekcie znaczną siłę. Pozostałe trzy siły są albo krótkozasięgowe, albo mogą mieć w niektórych sytuacjach charakter przyciągający, a w innych odpychający, dzięki czemu na ogół mają tendencję do zanikania w przypadku oddziaływania dużych ciał.

Następną kategorię stanowi siła elektromagnetyczna, która działa między elektrycznie naładowanymi cząstkami, takimi jak elektrony i kwarki, lecz nie działa na neutralne cząstki, takie jak neutrino. Jest znacznie silniejsza od siły grawitacji — siła elektromagnetyczna działająca między dwoma elektronami jest około milion milion milion milion milion milion (1 z czterdziestoma dwoma zerami) razy większa od siły grawitacji. Istnieją jednak dwa rodzaje ładunku elektrycznego — dodatni i ujemny. Siła działająca między dwoma dodatnimi ładunkami ma charakter odpychający, podobnie jak między dwoma ujemnymi ładunkami, lecz dwa ładunki o przeciwnych znakach przyciągają się.

Duże, makroskopowe ciała, takie jak Ziemia lub Słońce, zawierają niemal identyczne ilości dodatnich i ujemnych ładunków, zatem siły przyciągania i odpychania działające między poszczególnymi cząstkami kompensują się niemal całkowicie. W rezultacie elektromagnetyczne oddziaływanie takich ciał jest zanedbywalnie małe w porównaniu z wiążącą je siłą grawitacji. Lecz w skali atomów i molekuł siły elektromagnetyczne zdecydowanie dominują. Elektromagnetyczne przyciąganie ujemnie naładowanych elektronów i dodatnio naładowanych protonów zmusza elektrony do krążenia wokół jądra, podobnie jak grawitacja zmusza Ziemię do krążenia wokół Słońca. Oddziaływanie elektromagnetyczne jest wywołane przez wymianę olbrzymiej liczby nośników zwanych fotonami. Fotony wymieniane w ramach oddziaływania są cząstkami wirtualnymi. Jeżeli jednak elektron zmienia orbitę na inną, bliższą jądra, uwalniana energia może zostać uniesiona przez całkowicie realny foton. Foton ten może z kolei zostać zarejestrowany przez ludzkie oko — jako światło, o ile jego długość fali należy do zakresu widzialnego — lub przez inny detektor fotonów, na przykład błonę fotograficzną. I odwrotnie, jeżeli rzeczywisty foton zderzy się z atomem, może zostać pochłonięty, a jego energia zostanie zużyta na przeniesienie elektronu z orbity bliższej jądra na dalszą.

Trzecią kategorię stanowi tak zwane słabe oddziaływanie jądrowe. Z tą siłą nie mamy bezpośredniego kontaktu w codziennym życiu. Jest ona odpowiedzialna za radioaktywność, czyli za rozpady jąder atomowych. Jej natura nie była w pełni zrozumiała aż do połowy dwudziestego wieku, gdy w roku 1967 Abdus Salam z Imperial College w Londynie oraz Steven

Weinberg z Harvardu niezależnie od siebie sformułowali teorie, w ramach których oddziaływanie słabe zostało zunifikowane z elektromagnetyzmem, podobnie jak Maxwell sto lat wcześniej zunifikował elektryczność i magnetyzm. Przewidywania tych teorii zostały w pełni potwierdzone przez wyniki doświadczalne. W 1979 Salam, Weinberg oraz Sheldon Glashow (także z Harvardu) otrzymali Nagrodę Nobla za równoważne teorie unifikujące oddziaływania elektromagnetyczne oraz słabe oddziaływania jądrowe.

Czwartą kategorię stanowi najsilniejsza z sił przyrody, tak zwane silne oddziaływanie jądrowe. Także i z tą siłą nie mamy bezpośredniego kontaktu w codziennym życiu, lecz jest ona odpowiedzialna za utrzymanie w całości większości otaczającej nas materii. Wiąże ona kwarki w protonach i w neutronach, a także protony i neutrony w jądrach atomowych. Gdyby nie działało silne oddziaływanie jądrowe, elektryczne odpychanie dodatnio naładowanych protonów rozbiłoby wszystkie jądra atomowe we wszechświecie, oprócz jąder wodoru, których jądra stanowią pojedyncze protony. Silne oddziaływanie jądrowe jest przenoszone przez cząstki zwane gluonami, które oddziałują tylko ze sobą nawzajem oraz z kwarkami.

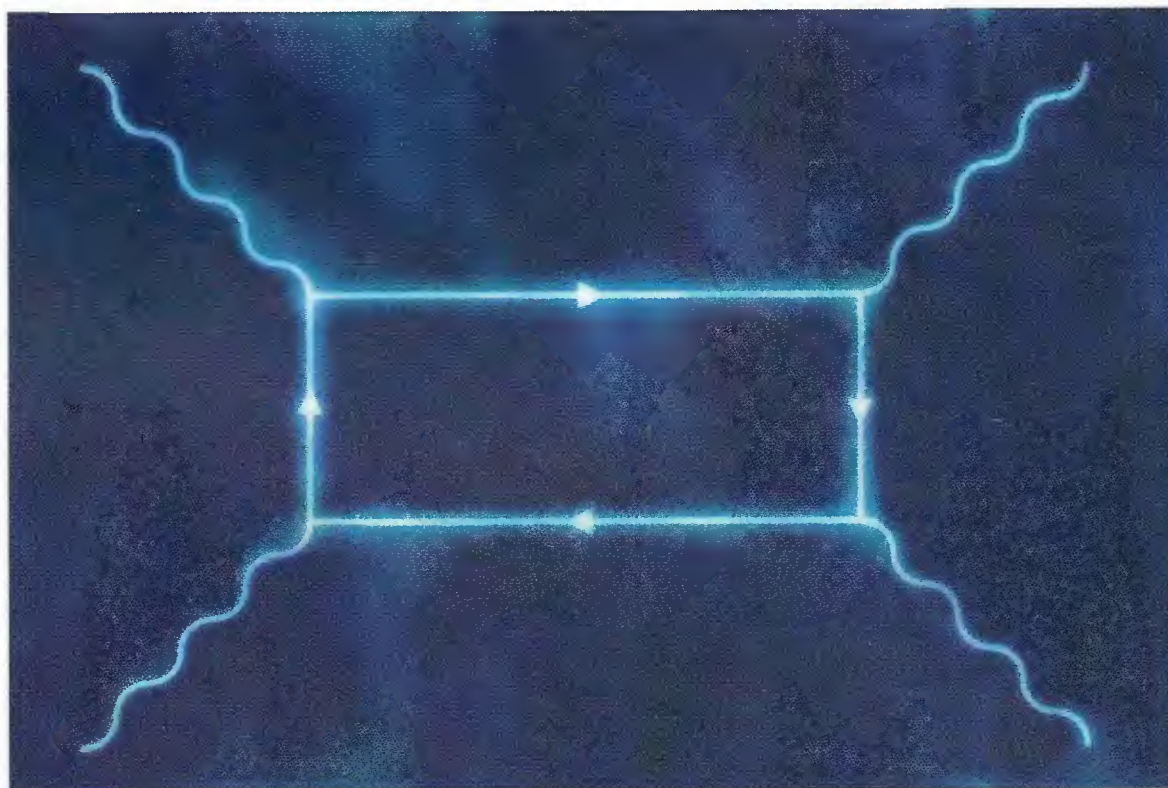


Diagram Feynmana wirtualnej pary cząstka/antycząstka

Zasada nieoznaczoności, zastosowana do elektronu, oznacza, że nawet w pustej przestrzeni pojawiają się i następnie anihilują wirtualne pary cząstka/antycząstka.

Sukces unifikacji oddziaływań elektromagnetycznych i słabych spowodował, że podjęto liczne próby połączenia tych dwóch oddziaływań z oddziaływaniem silnym w ramach tak zwanej wielkiej teorii unifikacji, w skrócie GUT [od ang. Grand Unified Theory]. Nazwa jest raczej przesadna, ponieważ wyniki tego programu ani nie wydają się specjalnie wielkie, ani nie są w pełni zunifikowane, ponieważ nie obejmują grawitacji. Nie są też w pełni kompletne, ponieważ zawierają pewne parametry, których wartości nie wynikają z teorii, lecz muszą być dobierane tak, aby dopasować teorię do wyników eksperymentów. Niemniej jest to pewien krok w kierunku kompletnej, w pełni zunifikowanej teorii.

Główna trudność w poszukiwaniach teorii, która unifikuje grawitację z pozostałymi oddziaływaniami, polega na tym, że teoria grawitacji, czyli ogólna teoria względności, jako jedyna z całej czwórki nie jest teorią kwantową — nie uwzględnia zasady nieoznaczoności. Częstkowe teorie opisujące pozostałe trzy oddziaływania w istotnym sensie opierają się na mechanice kwantowej, więc unifikowanie teorii grawitacji z pozostałymi teoriami wymaga znalezienia sposobu na uwzględnienie tej zasady w ogólnej teorii względności. Jak dotąd nikt nie zdołał jednak odkryć kwantowej teorii grawitacji.

Przyczyna, dla której kwantowa teoria grawitacji okazała się tak trudna do odkrycia, wiąże się z faktem, że zgodnie z zasadą nieoznaczoności nawet „pusta” przestrzeń jest wypełniona przez pary wirtualnych cząstek i antycząstek. Gdyby nie była — gdyby „pusta” przestrzeń była rzeczywiście całkowicie pusta — oznaczałoby to, że wszystkie pola, takie jak pola elektromagnetyczne lub pola grawitacyjne, musiałyby być dokładnie równe zero. Lecz wartość pola oraz szybkość jego zmian w czasie stanowią odpowiednik położenia i prędkości (rozumianej jako zmiana położenia w czasie) cząstki, a zasada nieoznaczoności mówi, że im dokładniej znana jest jedna z tych wielkości, tym mniej dokładnie znana jest druga. Gdyby pole w pustej przestrzeni było dokładnie równe zero, miałyby zarówno dokładną wartość (zero), jak i dokładne tempo zmian (także zero), co byłoby sprzeczne z zasadą nieoznaczoności. Musi zatem istnieć pewna nieokreśloność — czyli kwantowe fluktuacje — wartości pola.

Fluktuacje pola można sobie wyobrazić jako pary cząstek, które pojawiają się wspólnie w pewnej chwili, oddalają się, a następnie wracają i anihilują wzajemnie. Są to wirtualne cząstki, podobnie jak nośniki oddziaływań. W odróżnieniu od rzeczywistych cząstek cząstki wirtualne nie mogą być bezpośrednio obserwowane ani rejestrowane przez detektory. Istnieją jednak pewne pośrednie efekty, na przykład niewielkie zmiany energii elektronów na orbitach atomowych, które mogą być zmierzone.

Wyniki tych pomiarów zgadzają się z zadziwiająco dokładnością z przewidywaniami teorii. W przypadku fluktuacji pola elektromagnetycznego cząstkami wirtualnymi są fotony. W przypadku fluktuacji pola grawitacyjnego są to wirtualne grawitony. Lecz w przypadku fluktuacji pól oddziaływania słabego i silnego wirtualne pary cząstek tworzą pary cząstek materii, takich jak elektrony lub kwarki, wraz z odpowiednimi antycząstkami.

Problem polega na tym, że wirtualne cząstki mają energię, a ponieważ liczba wirtualnych par jest nieskończona, więc łącznie miałyby one nieskończoną energię, a zatem zgodnie z równaniem Einsteina (zob. rozdział 5) miałyby łącznie nieskończoną masę. Zgodnie z ogólną teorią względności grawitacja nieskończonej masy spowodowałaby zakrzywienie wszechświata do nieskończonej małych rozmiarów. To oczywiście nie dotyczy rzeczywistego wszechświata! Takie pozornie absurdalne nieskończoności pojawiają się także w innych cząstkowych teoriach — opisujących oddziaływania silne, słabe i elektromagnetyczne, lecz w tych trzech przypadkach nieskończoności można usunąć za pomocą procesu zwanego renormalizacją, dzięki któremu zdołaliśmy stworzyć kwantowe teorie tych sił. Renormalizacja polega na sztucznym wprowadzeniu nowych nieskończoności, które kompensują nieskończoności pojawiające się w danej teorii, pozostawiając jedynie niewielkie, resztkowe wartości, które identyfikujemy z wielkościami obserwowanymi w naturze i nazywamy je wartościami zrenormalizowanymi.

Koncepcja renormalizacji jest dość wątpliwa z czysto matematycznego punktu widzenia, lecz wydaje się, że działa ona bardzo dobrze, gdyż w teoriach oddziaływań silnych, słabych i elektromagnetycznych pozwala na dokonywanie przewidywań, które zgadzają się z wynikami obserwacji z godną podziwu dokładnością. Z punktu widzenia poszukiwań kompletnej teorii wszystkich oddziaływań renormalizacja ma poważną wadę, ponieważ wartości mas cząstek oraz stałych określających wielkości sił nie mogą być wyprowadzone z teorii, lecz muszą być dopasowane do wyników obserwacji. Niestety, próbując zastosować renormalizację do usunięcia kwantowych nieskończoności z ogólnej teorii względności, mamy tylko dwie wielkości, które można dopasowywać: stałą grawitacji oraz stałą kosmologiczną, którą Einstein wprowadził do swoich równań, ponieważ sądził, że wszechświat się nie rozszerza (zob. rozdział 7). Okazuje się, że dopasowywanie tych dwóch wielkości nie wystarcza do usunięcia wszystkich nieskończoności. W rezultacie dostajemy kwantową teorię grawitacji, która przewiduje, że niektóre wielkości, takie jak zakrzywienie czasoprzestrzeni, są nieskończone, podczas gdy w rzeczywistości wielkości te można obserwować, mierzyć i stwierdzić, że są jak najbardziej skończone!

Połączenie ogólnej teorii względności oraz zasady nieoznaczoności od jakiegoś czasu wydawało się problematyczne, lecz dopiero w 1972 roku potwierdziły to szczegółowe obliczenia. Cztery lata później zasugerowano możliwe rozwiązanie nazwane supergrawitacją. Niestety obliczenia niezbędne do zbadania, czy teoria supergrawitacji pozostawi jakieś nieskompensowane nieskończoności, okazały się tak trudne i pracochłonne, że nikt nie podjął się ich wykonania. Nawet za pomocą komputera zajęłyby wiele lat, bez żadnej gwarancji, że po drodze nie popełniono by żadnego błędu. Do ich potwierdzenia potrzebne byłyby niezależne obliczenia, wykonane przez kogoś innego, które dałyby taką samą odpowiedź, co nie wydawało się bardzo prawdopodobne! Mimo tych problemów i mimo że cząstki występujące w różnych wariantach supergrawitacji nie wydawały się odpowiadać cząstkom obserwowanym w przyrodzie, większość naukowców sądziła, że odpowiednio zmodyfikowana supergrawitacja może stanowić odpowiedź na problem unifikacji grawitacji i pozostałych oddziaływań. W 1984 roku zaszła jednak radykalna zmiana i zainteresowanie fizyków skupiło się na tak zwanych teoriach strun.

Przed erą teorii strun każda cząstka była uważana za byt, który zajmuje pojedynczy punkt w przestrzeni. W teoriach strun podstawowe byty nie są punktowe, lecz są obiektami posiadającymi jeden niezerowy wymiar — długość — podobnie jak nieskończenie cienka struna. Struny owe mogą mieć końce (są to tak zwane otwarte struny) lub mogą tworzyć zamknięte pętle (zamknięte struny). W dowolnym momencie cząstka znajduje się w jednym punkcie przestrzeni, natomiast struna zajmuje całą linię. Dwie struny mogą się połączyć i utworzyć pojedynczą strunę. W przypadku otwartych strun łączą się one końcami, natomiast zamknięte struny tworzą w takiej sytuacji coś w rodzaju pary nogawek od spodni. Możliwy jest także odwrotny proces — pojedyncza struna może się podzielić na dwie.

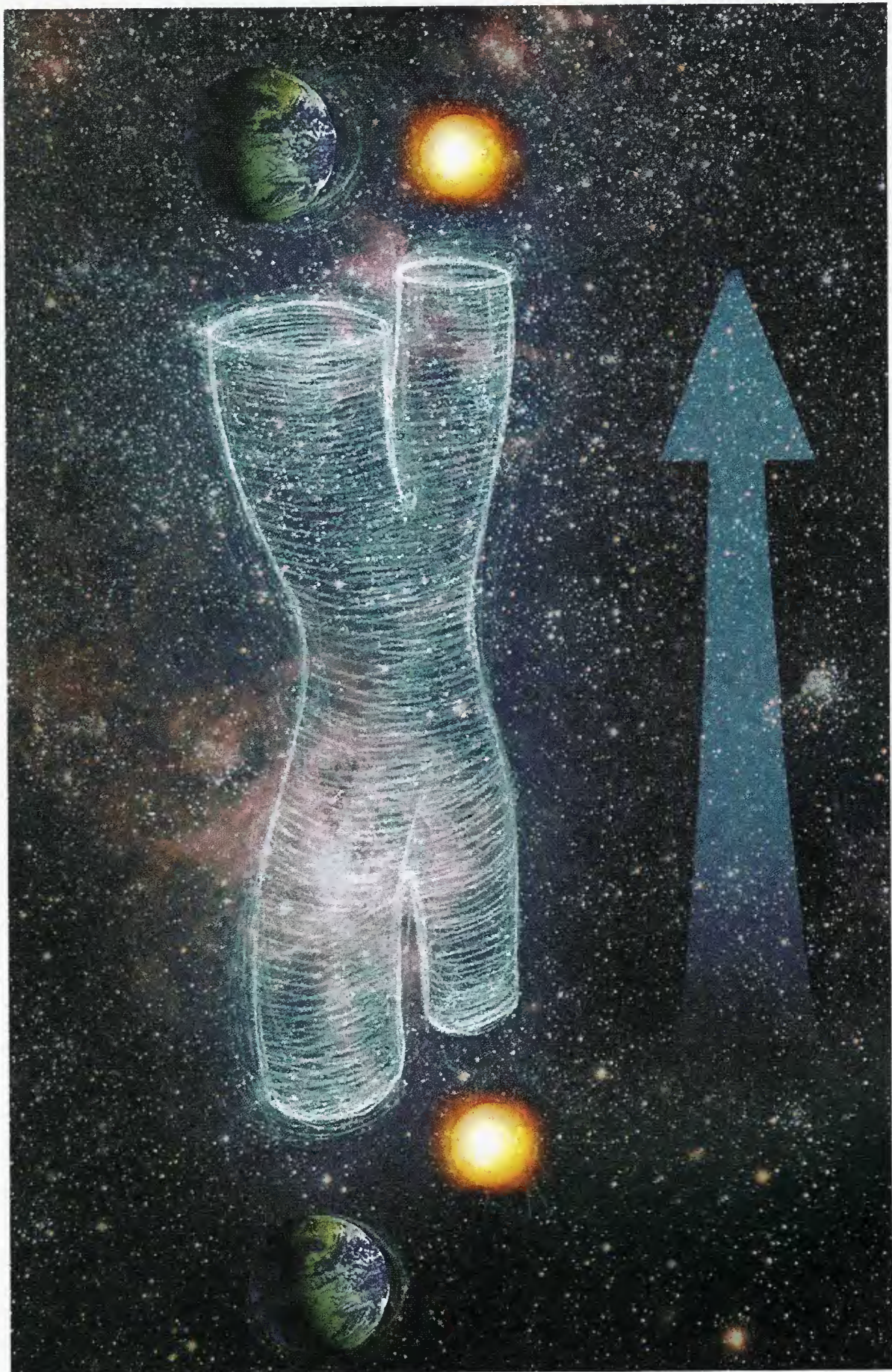
Jeżeli podstawowymi obiektami we wszechświecie są struny, to czym są punktowe cząstki, które obserwujemy w eksperymentach? Dotychczas uważaliśmy cząstki za obiekty punktowe. W teoriach strun różnym cząstkom odpowiadają różne fale na strunie, podobnie jak fale na napiętym sznurku latawca. Rozmiary strun są jednak tak małe, że nawet najlepsza współczesna technologia nie jest w stanie rozróżnić ich kształtu, więc we wszystkich eksperymentach zachowują się one jak pozbawione rozmiarów punkty. Wyobraźmy sobie, że patrzymy na cząstkę pyłu. W zbliżeniu lub pod szkłem powiększającym można się przekonać, że ma ona nieregularny kształt — może nawet podłużny jak struna — lecz z odległości wygląda jak pozbawiony rozmiarów punkt.

W teorii strun emisja lub absorpcja jednej cząstki przez inną odpowiada podziałowi lub połączeniu strun. W teoriach opartych na punktowych cząstkach grawitacyjne oddziaływanie Słońca na Ziemię jest przedstawiane jako proces emisji nośników oddziaływania zwanych grawitonami przez cząstki materii Słońca oraz ich absorpcji przez cząstki materii Ziemi. W teorii strun proces ten przypomina skrzyżowanie rur w kształcie litery H (jeżeli dostrzeżesz podobieństwo łączące teorię strun z kanalizacją, to nie jesteś odosobniony). Pionowe fragmenty litery H odpowiadają cząstkom znajdującym się w Słońcu i w Ziemi, natomiast łącząca je poprzeczka — grawitonowi, który wymieniają one między sobą.

Teoria strun ma ciekawą historię. Sformułowano ją w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku i pierwotnie miała opisywać oddziaływanie silne. Opierała się na idei, zgodnie z którą proton i neutron były traktowane jako fale na strunie. Oddziaływania między cząstkami odpowiadały dodatkowym fragmentom strun łączącym struny reprezentujące cząstki, podobnie jak nici w sieci pająka. Aby teoria ta mogła odtwarzać obserwowane wielkości oddziaływań między cząstkami, struny musiałyby być naciągnięte z siłą około dziesięciu ton.

W 1974 roku Joël Scherk z École Normale Supérieure w Paryżu oraz John Schwarz z California Institute of Technology opublikowali artykuł, w którym wykazali, że teoria strun mogłaby opisywać siłę grawitacji, pod warunkiem że naprężenie struny wynosi około tysiąca milionów milionów milionów milionów ton (1 z trzydziestoma dziewięćdziesięcioma zerami). Przewidywania takiej teorii zgadzałyby się z wynikami ogólnej teorii względności w normalnych skalach odległości, lecz różniłyby się na bardzo małych odległościach, mniejszych od jednej tysięcznej z milionowej z milionowej z milionowej z milionowej części centymetra (centymetr podzielony przez 1 z trzydziestoma trzema zerami). Artykuł ten nie zwrócił jednak większej uwagi, ponieważ w tym samym czasie większość fizyków zajmujących się badaniami oddziaływania silnego porzuciła struny na rzecz teorii opartej na kwarkach i gluonach, ze względu na jej lepszą zgodność z wynikami eksperymentów. Scherk zmarł w tragicznych okolicznościach (był chory na cukrzycę i zapadł w śpiączkę, gdy w pobliżu nie było nikogo, kto mógłby zrobić mu zastrzyk insuliny) i Schwarz pozostał niemal jedynym zwolennikiem teorii strun, w wersji ze znacznie większą wartością naprężenia.

W 1984 roku zainteresowanie teorią strun nagle powróciło, i to z dwóch powodów. Jeden polegał na tym, że nie uczyniono żadnych istotnych postępów w celu wykazania, że supergrawitacja może dawać skończone wyniki i opisywać takie cząstki, jakie obserwujemy w naturze. Drugim powo-



Diagramy Feynmana w teorii strun

W teoriach strun długozasięgowe oddziaływania są przedstawiane jako połączenia rur, a nie jako wymiana cząstek przenoszących siły.

dem była publikacja kolejnego artykułu Johna Schwarza, tym razem wspólnie z Mikiem Greenem z Queen Mary College w Londynie. Udowodnili oni, że w ramach teorii strun można wyjaśnić istnienie cząstek, które cechuje tak zwana lewoskrętność (lub „leworęczność”), widoczna w wynikach niektórych eksperymentów. (Zachowanie większości cząstek nie ulega zmianie, jeżeli układ eksperymentalny zamieni się na jego lustrzane odbicie, lecz istnieją pewne cząstki, których zachowanie zależy od tego, w którym z dwóch lustrzanych kopii eksperymentu biorą one udział; można powiedzieć, że w pewnym sensie nie są one dwuręczne, lecz lewo- lub praworęczne). Niezależnie od przyczyn znaczna liczba fizyków zaczęła pracować nad teorią strun i niebawem pojawiła się nowa wersja teorii, w ramach której możliwe stało się wyjaśnienie obserwowanych rodzajów cząstek.

Teorie strun także prowadzą do niepożądanych nieskończoności, lecz wydaje się, że w ramach poprawnej wersji wszystkie nieskończoności się skompensują (aczkolwiek nie jest to jeszcze całkiem pewne). Istnieje jednak inny, poważny problem — wydaje się, że są one spójne tylko wtedy, gdy czasoprzestrzeń ma albo dziesięć, albo dwadzieścia sześć wymiarów zamiast zwykłych czterech! Dodatkowe wymiary stanowią oczywiście chleb powszedni w literaturze science fiction, ponieważ umożliwiają pokonanie ograniczeń ogólnej teorii względności — podróży szybciej od światła lub wstecz w czasie (zob. rozdział 10). Zazwyczaj polega to na skorzystaniu ze skrótu przez dodatkowe wymiary, który można sobie wyobrazić następująco. Załóżmy, że żyjemy w świecie, który ma tylko dwa wymiary i jest zakrzywiony w taki sposób, że tworzy powierzchnię obwarzanka lub pojedynczego ogniwa łańcucha. Ktoś, kto znajduje się po wewnętrznej stronie obwarzanka i chce się dostać do punktu położonego naprzeciwko — na drugim końcu średnicy obwarzanka — musi poruszać się wzdłuż wewnętrznego okręgu i pokonać połowę obwodu okręgu, zanim dotrze do celu. Gdyby jednak mógł poruszać się w trzecim wymiarze, mógłby opuścić powierzchnię obwarzanka i wybrać znacznie krótszą drogę wzdłuż średnicy.

Jeżeli te dodatkowe wymiary rzeczywiście istnieją, to dlaczego ich nie widzimy? Dlaczego widzimy tylko trzy wymiary przestrzenne i jeden czasowy? Przyczynę może stanowić fakt, że dodatkowe wymiary nie są zupełnie takie jak te, do których jesteśmy przyzwyczajeni, ponieważ są zakrzywione w przestrzeni o bardzo małych rozmiarach, rzędu jednej milionowej z milionowej z milionowej z milionowej części centymetra. Jest to tak mały rozmiar, że po prostu go nie dostrzegamy — widzimy tylko jeden wymiar czasowy oraz trzy przestrzenne, w których czasoprzestrzeń jest względnie płaska. Aby zrozumieć, jak to działa, wy-

obraźmy sobie powierzchnię słomki. Jeżeli spojrzymy na nią z bliska, stwierdzimy, że jest dwuwymiarowa. Wskazanie punktu wymaga podania dwóch liczb: odległości wzdłuż słomki oraz położenia na obwodzie. Lecz grubość jest znacznie mniejsza od długości słomki, więc jeżeli spojrzymy na nią z większej odległości, nie zobaczymy obwodu. Widoczny będzie tylko jeden wymiar, to znaczy że — pozornie — dla określenia położenia punktu wystarczy podać tylko odległość wzdłuż słomki. Podobnie rzecz się ma z czasoprzestrzenią w teorii strun — w bardzo małej skali jest dziesięciowymiarowa i silnie zakrzywiona, lecz w większej skali ani zakrzywienie, ani dodatkowe wymiary nie są widoczne.

Jeżeli ten model jest poprawny, to jest to zła wiadomość dla przyszłych podróżników: dodatkowe wymiary są o wiele za małe, aby zmieścił się w nich statek kosmiczny. Dla naukowców też stanowią one poważny problem, mianowicie dlaczego tylko niektóre, a nie wszystkie wymiary są zakrzywione w małe okręgi. W bardzo wczesnym wszechświecie wszystkie wymiary były zapewne bardzo silnie zakrzywione. Dlaczego jeden wymiar czasowy i trzy przestrzenne się wyprostowały, a reszta pozostała mocno zakrzywiona?

Jedna z możliwych odpowiedzi odwołuje się do zasady antropicznej, którą można sformułować mniej więcej w taki sposób: „Widzimy wszechświat taki, jaki jest, ponieważ istniejemy”. Istnieją dwie wersje zasady antropicznej, słaba i silna. Słaba zasada stwierdza, że we wszechświecie, który jest duży lub nieskończony w sensie przestrzennym i/lub czasowym, warunki niezbędne do rozwoju inteligentnego życia powstaną tylko w pewnych czasowo i przestrzennie ograniczonych obszarach. Inteligentne istoty, które pojawią się w tych obszarach, nie powinny zatem być zdziwione, jeżeli zaobserwują, że w ich zakątku wszechświata spełnione są warunki niezbędne do ich istnienia. Na podobnej zasadzie bogacz żyjący w luksusowej dzielnicy nie widzi wokół siebie biedy.

Niektórzy badacze idą znacznie dalej i sugerują silną wersję zasady antropicznej, zgodnie z którą istnieje wiele różnych wszechświatów lub wiele różnych obszarów pojedynczego wszechświata i każdy z nich jest zdeterminowany przez inne warunki początkowe, a może nawet przez inne prawa przyrody. W większości tych wszechświatów warunki nie będą sprzyjające dla rozwoju złożonych organizmów. Tylko w nielicznych wszechświatach podobnych do naszego rozwiną się inteligentne istoty i zaczną zadawać pytanie: Dlaczego wszechświat jest taki, jaki widzimy? Odpowiedź jest prosta: gdyby był inny, nie byłoby nas tutaj!

Niewielu ludzi kwestionuje słuszność lub przydatność słabej zasady antropicznej, lecz istnieje wiele zastrzeżeń wobec silnej zasady antropicznej

jako wyjaśnienia obserwowanego stanu wszechświata. Na przykład, w jakim sensie można mówić o istnieniu tych wszystkich różnych wszechświatów? Jeżeli rzeczywiście są oddzielne i wzajemnie niezależne, to wszystko, co dzieje się w którymś z nich, nie może mieć żadnych obserwowalnych konsekwencji w naszym wszechświecie. Możemy zatem zastosować zasadę ekonomii i zignorować wszystkie niezależne wszechświaty. Jeżeli natomiast byłyby to tylko różne obszary tego samego wszechświata, prawa natury musiałyby być takie same w każdym obszarze, gdyż w przeciwnym przypadku nie moglibyśmy przemieszczać się płynnie z jednego obszaru do innego. W takim przypadku jedyną różnicą między różnymi obszarami byłyby warunki początkowe, a zatem silna zasada antropiczna zostałaby zredukowana do słabej.

Zasada antropiczna daje jedną z możliwych odpowiedzi na pytanie, dlaczego dodatkowe wymiary z teorii stun są zwinięte. Nie wydaje się, aby dwa wymiary przestrzenne były wystarczające do rozwoju złożonych istot, takich jak my. Na przykład dwuwymiarowe istoty żyjące na okręgu (czyli na powierzchni dwuwymiarowej Ziemi) musiałyby się nawzajem przenikać, żeby się minąć. Gdyby dwuwymiarowa istota zjadła coś, czego nie może całkowicie strawić, musiałaby wydaląć resztki tą samą drogą, którą połączyła pokarm; w przeciwnym przypadku musiałoby istnieć przejście przez środek jej ciała, które podzieliłoby ciało na dwie oddzielne części — istota taka rozpadłaby się po każdym posiłku. Z tych samych powodów trudno wyobrazić sobie coś w rodzaju cyrkulacji krwi w dwuwymiarowym ciele.

Problemy pojawiłyby się także w przypadku liczby wymiarów większej od trzech. Siła grawitacji zmniejszałaby się ze wzrostem odległości szybciej niż w trzech wymiarach (w trzech wymiarach siła grawitacji zmniejsza się czterokrotnie przy podwojeniu odległości; w czterech wymiarach zmniejszałaby się ośmiokrotnie, w pięciu wymiarach — szesnastokrotnie i tak dalej). W takim przypadku orbity planet, łącznie z Ziemią, byłyby niestabilne. Najmniejsze zaburzenie (na przykład oddziaływanie ze strony innych planet) powodujące odstępstwo od kołowej orbity wywołałoby ucieczkę planety w przestrzeń lub spadek na Słońce. W rezultacie albo zamarzlibyśmy, albo zostalibyśmy spaleni. W gruncie rzeczy zależność grawitacji od odległości w przestrzeni o większej liczbie wymiarów oznacza, że Słońce nie mogłoby istnieć w stabilnym stanie, z ciśnieniem równoważącym grawitację. Słońce rozpadłoby się lub zapadło do czarnej dziury. Tak czy inaczej, niewielki byłby z niego pożytek, gdyż nie nadawałoby się na źródło ciepła i światła dla życia na Ziemi. W mniejszej skali siły elektryczne, które utrzymują elektrony na orbitach w atomie, zachowywałyby się tak samo

jak siły grawitacji. Elektrony uciekałyby z atomu lub spadałyby na jądro. Nie byłoby zatem atomów w znanej nam postaci.

Wydaje się, że życie — przynajmniej w takiej postaci, jaką znamy — może istnieć tylko w obszarach czasoprzestrzeni, w których jeden wymiar czasowy i trzy wymiary przestrzenne nie są zwinięte do małych rozmiarów. Możemy zatem odwołać się do słabej zasady antropicznej, pod warunkiem że potrafimy udowodnić, iż teoria strun przynajmniej dopuszcza istnienie takich obszarów czasoprzestrzeni. Wydaje się, że jest to w istocie możliwe. Mogą istnieć inne obszary wszechświata lub inne wszechświaty (cokolwiek to znaczy), w których wszystkie wymiary są zwinięte lub w których więcej niż cztery wymiary są niemal płaskie, lecz nie będzie tam inteligentnych istot, które mogłyby zaobserwować różną liczbę efektywnych wymiarów.

Na dodatek, oprócz samej kwestii wymiarów, jest jeszcze problem liczby teorii — istnieje co najmniej pięć różnych teorii strun (dwie teorie



Dlaczego warto żyć w trzech wymiarach?

W większej liczbie wymiarów orbity planet byłyby niestabilne i planety spadałyby na Słońce lub uciekały z zasięgu jego przyciągania.

otwartych strun i trzy różne teorie zamkniętych strun) oraz miliony sposobów zwijania dodatkowych wymiarów przewidywanych przez teorie strun. W jaki sposób wybrać jedną teorię i jeden sposób zwijania wymiarów? Nikt nie umiał wskazać odpowiedzi na te pytania, co na jakiś czas spowodowało stagnację w rozwoju teorii, lecz mniej więcej od 1994 roku zaczęto odkrywać tak zwane dualizmy: różne teorie strun i różne sposoby zwijania dodatkowych wymiarów prowadziły do tych samych rezultatów w czterech wymiarach. Co więcej, oprócz cząstek, które zajmują pojedyncze punkty w przestrzeni, oraz strun, które są liniami, odkryto inne jeszcze obiekty, zwane p -branami, które zajmują dwu- lub więcejwymiarowe obszary przestrzeni (punktowa cząstka może być uważana za 0-branę, struna — za 1-branę, lecz istnieją także p -brany dla $p = 2$ oraz dla większych wartości p , aż do $p = 9$; 2-brana stanowi coś w rodzaju dwuwymiarowej membrany; brany o większej liczbie wymiarów jest trudniej sobie wyobrazić). Wydaje się, że może istnieć pewnego rodzaju demokracja (w sensie jednokowego prawa głosu) wśród teorii strun, supergravitacji oraz teorii p -bran. Wszystkie one wydają się wzajemnie pasować i żadna nie wydaje się bardziej fundamentalna niż pozostałe. Być może wszystkie stanowią różne przybliżenia jakiejś bardziej fundamentalnej teorii i każda jest słuszna w jakiejś szczególnej sytuacji.

Poszukiwania tej ogólnej teorii nie dały na razie żadnych rezultatów. Nie możemy wykluczyć, że nie istnieje żadne wyróżnione sformułowanie fundamentalnej teorii, podobnie jak nie istnieje jedno wyróżnione sformułowanie arytmetyki w ramach jednego zbioru aksjomatów — co udowodnił Gödel. Być może jest tak jak z mapami — nie da się użyć jednej płaskiej mapy do opisu kulistej powierzchni Ziemi lub powierzchni obwarzanka. W przypadku Ziemi potrzebne są co najmniej dwie mapy, a w przypadku obwarzanka cztery, aby pokryć wszystkie punkty. Każda mapa obejmuje tylko pewien ograniczony obszar, różne mapy częściowo się pokrywają i w rezultacie kompletny zbiór map stanowi pełny opis powierzchni. Na podobnej zasadzie w fizyce niezbędne może być zastosowanie różnych wersji teorii w różnych sytuacjach, lecz dwa różne sformułowania mogą być zgodne wtedy, gdy oba mogą być zastosowane.

Jeżeli to prawda, to pełny zbiór różnych sformułowań teorii mógłby być uważany za kompletną, jednolitą teorię, lecz teoria ta nie mogłaby być sformułowana w kategoriach pojedynczego zbioru postulatów. Lecz natura może nie dopuszczać nawet tak ogólnej teorii. Czy jest możliwe, że zunifikowana teoria w ogóle nie istnieje? Czy poszukujemy nieistniejącego miarzu? Wydaje się, że są trzy możliwości:

1. Istnieje kompletna zunifikowana teoria (lub zbiór nakładających się sformułowań teorii), którą kiedyś odkryjemy, jeżeli okazemy się dostatecznie bystrzy.
2. Nie istnieje ostateczna teoria wszechświata, lecz tylko nieskończony szereg teorii, które opisują wszechświat coraz lepiej, lecz nigdy nie będą całkowicie dokładne.
3. Nie istnieje teoria wszechświata — zjawiska, poza pewnym ograniczonym ich zbiorem, nie dają się przewidywać, lecz zachodzą przypadkowo i dowolnie.

Zwolennicy trzeciego punktu argumentują, że gdyby istniał kompletny zbiór praw przyrody, naruszałby prawo Boga do zmiany zdania i do wpływania na losy wszechświata. Jeżeli jednak Bóg jest wszechmocny, to czy On sam nie może naruszać swojego prawa wyboru? Takie pytania prowadzą do starego paradoksu: Czy Bóg może stworzyć kamień tak ciężki, że On sam nie może go podnieść? W rzeczywistości idea Boga, który chciałby zmieniać zdanie, stanowi przykład sofizmu — na który zwrócił uwagę św. Augustyn — wynikającego z wyobrażenia Boga jako istoty żyjącej w czasie. Lecz czas jest jedynie własnością wszechświata stworzonego przez Boga. Bóg zapewne wiedział, czego chce, gdy stworzył wszechświat!

Wraz z odkryciem mechaniki kwantowej musieliśmy uznać, że zjawisk nie da się przewidywać z absolutną dokładnością — zawsze istnieje jakiś stopień niepewności. Można tę przypadkowość przypisać działaniu Boga, lecz byłby to w istocie bardzo dziwny rodzaj działania, pozbawiony jakiegokolwiek pozorów celowości. W gruncie rzeczy, gdyby działanie to miało jakiegokolwiek cel, nie byłoby — z definicji — działaniem przypadkowym. We współczesnej nauce trzecia z wyżej wymienionych możliwości została efektywnie usunięta, ponieważ przeddefiniowaliśmy cel nauki w taki sposób, że obecnie jest nim poszukiwanie zbioru praw przyrody, które umożliwiają przewidywanie zjawisk w granicach dopuszczalnych przez zasadę nieokreśloności.

Druga możliwość, że istnieje nieskończony szereg coraz bardziej wyrafinowanych teorii, jest zgodna z całym naszym dotychczasowym doświadczeniem. Wielokrotnie zdarzało się, że gdy zwiększaliśmy czułość naszych pomiarów lub wykonywaliśmy nowe kategorie pomiarów, odkrywaliśmy zjawiska nieprzewidywane przez istniejące teorie. Aby uwzględnić nowe odkrycia, musieliśmy rozwijać bardziej zaawansowane teorie. Badając oddziaływania cząstek przy coraz wyższych energiach, możemy faktycznie oczekiwać odkrycia nowych poziomów struktury, bardziej fundamentalnych niż kwarki i elektrony, które obecnie uważamy za cząstki „elementarne”.

Granice tej sekwencji „pudełek w pudełkach” może ustanowić grawitacja. Gdyby istniała cząstka o energii większej od tak zwanej energii Plancka, jej masa byłaby tak skoncentrowana, że cząstka odcięłaby się od reszty wszechświata i utworzyła małą czarną dziurę. Wydaje się zatem, że sekwencja coraz bardziej wyrafinowanych teorii opisujących zjawiska w coraz wyższych energiach powinna jednak mieć jakąś granicę, a w konsekwencji powinna także istnieć jakaś ostateczna teoria wszechświata. Lecz od energii, które potrafimy obecnie wygenerować w laboratorium, do energii Plancka jest tak daleka droga, że nie pokonamy jej za pomocą akceleratorów cząstek w dającej się przewidzieć przyszłości. Takie energie musiały jednak pojawić się w bardzo wczesnych fazach istnienia wszechświata. Badania wczesnego wszechświata uwzględniające wymogi matematycznej spójności mogą zatem przy odrobinie szczęścia doprowadzić do odkrycia kompletnej, jednolitej teorii w trakcie życia niektórych z obecnie żyjących naukowców, pod warunkiem że w międzyczasie nie sprowadzimy na siebie zagłady!

Co właściwie oznaczałoby odkrycie ostatecznej teorii wszechświata?

Jak wyjaśniliśmy w rozdziale 3, nigdy nie możemy mieć całkowitej pewności, że znaleźliśmy poprawną teorię, ponieważ teorii nie da się udowodnić. Jeżeli jednak teoria będzie matematycznie spójna i zawsze będzie dawać przewidywania zgodne z obserwacjami, możemy mieć względną pewność, że jest poprawna. Zakończy długi i chwalebny rozdział w intelektualnych zmaganiach ludzkości o zrozumienie wszechświata i umożliwi także zrozumienie praw rządzących wszechświatem przez zwykłych ludzi.

W czasach Newtona wykształcona osoba miała szansę poznać i zrozumieć całość ludzkiej wiedzy, przynajmniej w ogólnych zarysach. Lecz rosnące tempo rozwoju nauki spowodowało, że z czasem takie zrozumienie stało się niemożliwe. Ciągły dopływ nowych wyników i obserwacji powoduje, że teorie są wciąż zmieniane, ulepszone i nigdy nie są w pełni dopracowane i zarazem dostatecznie uproszczone, aby zwykli ludzie mogli je zrozumieć. Nawet czynni naukowcy mogą mieć nadzieję na pełny wgląd tylko w niewielki wycinek całej nauki. Co więcej, tempo rozwoju nauki jest tak duże, że to, czego się uczyliśmy w szkole czy nawet na uniwersytecie, zawsze jest trochę przestarzałe. Tylko nieliczni uczeni potrafią nadążać za umykającymi granicami poznania, lecz muszą specjalizować się w niewielkim obszarze i poświęcać mu cały swój czas. Reszta populacji ma niewielkie pojęcie na temat nieustannych postępów w nauce oraz podniecenia, jakie one wywołują. Z drugiej strony — jeżeli wierzyć Eddingtonowi — siedemdziesiąt lat temu tylko dwie osoby rozumiały ogólną teorię względności. Dzisiaj rozumieją ją dziesiątki tysięcy absolwentów uniwersytetów,

a miliony ludzi są przynajmniej zaznajomione z samą ideą. Jeżeli kompletna, jednolita teoria zostanie kiedykolwiek odkryta, to jedynie kwestią czasu będzie jej dopracowanie i uproszczenie w taki sposób, aby można uczyć o niej w szkole, przynajmniej w ogólnych zarysach. Wszyscy będziemy wtedy w większym czy mniejszym stopniu mogli rozumieć prawa, które rządzą wszechświatem i są odpowiedzialne za nasze istnienie.

Nawet jeżeli rzeczywiście odkryjemy kompletną, jednolitą teorię, nie oznacza to, że będziemy mogli przewidywać dowolne zdarzenia, i to z dwóch powodów. Pierwsze ograniczenie wynika z kwantowomechanicznej zasady nieoznaczoności, która nie pozwala na dowolnie dokładne przewidywania i której w żaden sposób nie da się obejść. W praktyce ograniczenie to jest jednak mniej dotkliwe niż drugie, które wynika z faktu, że najprawdopodobniej nie będziemy umieli rozwiązać równań tej teorii, z wyjątkiem kilku bardzo prostych sytuacji. Jak już wspomnieliśmy, nikt nie potrafi rozwiązać równań rządzących oddziaływaniami cząstek w atomie składającym się z jądra i więcej niż jednego elektronu. Nie potrafimy nawet dokładnie rozwiązać równania ruchu dla trzech ciał w tak prostej teorii jak teoria grawitacji Newtona, a trudności rosną wraz ze wzrostem liczby ciał oraz złożoności teorii. Przybliżone równania zwykle wystarczają w zastosowaniach, lecz raczej nie spełniają one wielkich oczekiwań związanych z szumnym określeniem „zunifikowana teoria wszystkiego”!

Obecnie znamy już prawa, które rządzą zachowaniem materii we wszystkich warunkach oprócz tych najbardziej ekstremalnych. W szczególności znamy fundamentalne prawa, które stanowią podstawę całej chemii i biologii, lecz z pewnością nie zdołaliśmy zredukować tych dziedzin wiedzy do statusu rozwiązanych problemów. Nie odnosimy, jak dotąd, znaczących sukcesów w przewidywaniu ludzkiego zachowania na podstawie równań matematycznych! Więc nawet jeżeli odkryjemy kompletny zbiór podstawowych praw, będziemy mieć całe lata na intelektualnie wymagające zmagania z formułowaniem coraz lepszych, przybliżonych metod rozwiązywania równań, które pozwolą dokonywać pożytecznych przewidywań w złożonych, realistycznych sytuacjach. Kompletna, spójna, jednolita teoria to zaledwie pierwszy krok na drodze do całkowitego zrozumienia otaczających nas zjawisk oraz naszej egzystencji.

Zakończenie

ŻYJEMY W OSZAŁAMIAJĄCYM ŚWIECIE. Chcemy zrozumieć to, co widzimy wokół siebie. Zadajemy sobie pytania: Jaka jest natura wszechświata? Jakie jest nasze miejsce w nim? Skąd pochodzimy? Jak powstał wszechświat? Dlaczego jest taki, jaki jest?

Próbując odpowiedzieć na te pytania, tworzymy sobie pewien obraz wszechświata. Takim obrazem jest nieskończona wieża żółwi, a także teoria superstrun. Oba obrazy stanowią pewne teorie wszechświata, aczkolwiek ta druga jest nieco bardziej matematyczna i ścisła. Obu teoriom brakuje dowodów obserwacyjnych — nikt nigdy nie widział gigantycznego żółwia z Ziemią na grzbiecie i nikt nie widział superstruny. Każda z tych dwóch teorii daje jednak pewne przewidywania, które można sprawdzać. Lecz teoria żółwi nie jest poprawną teorią naukową, ponieważ przewiduje ona, że ludzie mogą spadać z krawędzi świata. To przewidywanie nie zgadza się z doświadczeniem, chyba że miałoby ono stanowić wyjaśnienie dla ludzi, którzy jakoby zniknęli w Trójkącie Bermudzkim!

Pierwsze próby teoretycznego opisu i wyjaśnienia wszechświata opierały się na idei, że zdarzenia i zjawiska zachodzące w naturze są kontrolowane przez obdarzone ludzkimi emocjami duchy, które zachowują się w bardzo ludzki i nieprzewidywalny sposób. Duchy te zamieszkiwały różne miejsca na Ziemi, takie jak morza, rzeki i góry, a także ciała niebieskie, łącznie ze Słońcem i Księżycem. Aby utrzymać regularne zmiany pór roku, płodność ziemi i obfite zbiory, należało zapewnić sobie przychylność owych duchów. W końcu ktoś musiał jednak zwrócić uwagę na pewne regularności — Słońce zawsze wschodziło na wschodzie i zachodziło na zachodzie niezależnie od tego, czy bóg Słońca otrzymał ofiarę czy nie. Co więcej, Słońce, Księżyc oraz planety poruszały się wzdłuż ściśle określonych dróg na niebie, które można z góry i bardzo dokładnie przewidzieć. Słońce i Księżyc mogą nadal być bogami, lecz bogowie owi przestrzegają



Od żółwi do zakrzywionej przestrzeni
Starożytne i współczesne poglądy na wszechświat

praw ściśle i najwyraźniej bez żadnych wyjątków, jeżeli nie liczyć takich historii jak zatrzymanie Słońca przez Jozuego.

Początkowo regularności i prawa były widoczne tylko w astronomii i w kilku innych, nielicznych sytuacjach. Lecz w miarę rozwoju cywilizacji, a zwłaszcza w ciągu ostatnich trzystu lat odkrywano coraz więcej regularności i praw. Pod wpływem skuteczności i sukcesów tych praw na początku dziewiętnastego wieku Laplace wysunął postulat naukowego determinizmu, to znaczy zasugerował, że istnieje zbiór praw, które precyzyjnie określają i determinują ewolucję wszechświata, poczynając od konkretnej konfiguracji w dowolnej chwili.

Determinizm Laplace'a był niekompletny w tym sensie, że nie mówił, w jaki sposób prawa natury powinny być wybrane, i nie precyzował początkowych warunków wszechświata — zostawiał je Bogu. Bóg zdecydował, jak wszechświat się zaczął i jakich praw miał przestrzegać, lecz nie interweniował w jego późniejszą ewolucję. W rezultacie Bóg został relegowany do tych dziedzin, których dziewiętnastowieczna nauka nie rozumiała.

Obecnie wiemy, że determinizm — przynajmniej w takiej wersji, jaką wyobrażał sobie Laplace — jest niemożliwy. Kwantowomechaniczna zasada nieoznaczoności stwierdza, że pewne pary wielkości, takie jak położenie i prędkość cząstki, nie mogą być równocześnie wyznaczone z absolutną dokładnością. Mechanika kwantowa wcieliła tę zasadę w ramach klasy teorii

kwantowych, w których cząstki nie mają dokładnie określonych położeń i prędkości, ponieważ są reprezentowane przez fale. Teorie te są deterministyczne w takim sensie, że podają prawa rządzące ewolucją fal w czasie. Jeżeli znamy parametry fali w danej chwili, to możemy je obliczyć w innej, dowolnie wybranej chwili. Element nieprzewidywalnej przypadkowości pojawia się tylko wtedy, gdy próbujemy interpretować fale w kategoriach położeń i prędkości cząstek. Tu prawdopodobnie znajduje się źródło naszych kłopotów — być może nie ma żadnych położeń ani prędkości cząstek, lecz tylko fale. Próbując dopasować fale do naszych utartych wyobrażeń o materii zbudowanej z cząstek, powodujemy zamieszanie, które z kolei staje się przyczyną pozornej nieprzewidywalności.

W efekcie przededefiniowaliśmy cel nauki, który stanowi teraz poszukiwanie praw pozwalających przewidywać zdarzenia w ramach ograniczeń wynikających z zasady nieoznaczoności. Pozostaje jednak pytanie, jak i dlaczego wybrane zostały owe prawa, a także początkowy stan wszechświata.

W tej książce szczególnie wiele uwagi poświęciliśmy prawom, które rządzą grawitacją, ponieważ to grawitacja kształtuje wielkoskalową strukturę wszechświata, mimo że jest ona najsłabszą ze wszystkich czterech sił przyrody. Prawa grawitacji są sprzeczne z dominującym do niedawna poglądem, że wszechświat jest niezmienny w czasie. Siła grawitacji ma zawsze przyciągający charakter, co oznacza, że wszechświat musi albo się rozszerzać, albo kurczyć. Zgodnie z teorią względności w przeszłości musiał zaistnieć stan o nieskończonej gęstości, wielki wybuch, który stanowiłby efektywny początek czasu. I podobnie, jeżeli cały wszechświat się zapadnie, w przyszłości musi zaistnieć stan o nieskończonej gęstości, wielki kres, który będzie końcem czasu. Nawet jeżeli cały wszechświat się nie zapadnie, istnieją osobliwości w zlokalizowanych obszarach, które zapadły się, tworząc czarne dziury. Osobliwości te stanowią koniec czasu dla każdego, kto wpadnie w czarną dziurę. W wielkim wybuchu oraz w innych osobliwościach wszystkie prawa fizyki załamują się, więc Bóg nadal będzie miał całkowitą swobodę w kwestii wyboru początków wszechświata.

Gdy połączymy mechanikę kwantową z ogólną teorią względności, pojawi się nowa możliwość, której dotychczas nie braliśmy pod uwagę — przestrzeń i czas mogą wspólnie tworzyć skończoną, czterowymiarową czasoprzestrzeń pozbawioną osobliwości i granic, podobnie jak powierzchnia Ziemi, lecz w większej liczbie wymiarów. Wydaje się, że idea ta mogłaby wyjaśnić wiele z obserwowanych cech wszechświata, takich jak wielkoskalowa jednorodność, a także odstępstwa od jednorodności w mniejszej skali: galaktyki, gwiazdy, a nawet istoty ludzkie. Lecz koncep-

cja całkowicie samowystarczalnego, pozbawionego osobliwości i granic, w pełni określonego przez jednolitą teorię wszechświata wnosi poważne konsekwencje dla roli Boga jako stwórcy.

Einstein zapytał kiedyś: „Jaki wybór miał Bóg, gdy stworzył wszechświat?”. Jeżeli hipoteza wszechświata bez brzegów jest poprawna, Bóg nie miał w ogóle wyboru przy określaniu warunków początkowych. Nadal miał oczywiście swobodę wyboru praw rządzących wszechświatem, lecz niekoniecznie oznacza to realną swobodę wyboru, ponieważ mogła istnieć tylko jedna (lub niewielka ich liczba) kompletna, jednolita teoria, która była wewnętrznie spójna i dopuszczała istnienie tak skomplikowanych struktur jak ludzkie istoty, które potrafią badać prawa przyrody i zadawać pytania o naturę Boga.

Nawet jeżeli istnieje tylko jedna możliwa jednolita teoria, stanowi ona jedynie zbiór reguł i równań. Skąd wziął się wszechświat, który opisują te równania? Nauka konstruuje matematyczne modele, lecz nie odpowiada na pytania, dlaczego powinny istnieć byty, które wcielają się w owe modele. Dlaczego wszechświat w ogóle zadał sobie tyle trudu, aby istnieć? Czy zunifikowana teoria jest tak przekonująca, że stworzyła sama siebie? Czy potrzebowała Stwórcy, a jeżeli tak, to czy wywiera On jakikolwiek wpływ na wszechświat? I kto stworzył Stwórcę?

Jak dotąd, większość naukowców była zbyt zajęta tworzeniem, rozwijaniem i weryfikowaniem nowych teorii opisujących wszechświat, aby zadawać pytania o przyczyny. Z drugiej strony, ludzie, którzy zajmują się zawodowo pytaniami o przyczyny, czyli filozofowie, nie nadążali za postępami teorii naukowych. W osiemnastym wieku filozofowie traktowali całą ludzką wiedzę, łącznie z nauką, jako swoją dziedzinę i dyskutowali także na takie tematy, jak początki wszechświata. Lecz w dziewiętnastym i dwudziestym wieku nauka stała się tak rozległa, technicznie i matematycznie zaawansowana, że przestała być zrozumiała dla filozofów, a właściwie dla każdego oprócz wąskiej elity specjalistów. Filozofowie do tego stopnia zredukowali zakres swoich badań, że Wittgenstein, najsłynniejszy filozof dwudziestego wieku, stwierdził, iż „jedynym zadaniem filozofii pozostała analiza języka”. Cóż za upadek w porównaniu z wielkimi tradycjami filozofii od Arystotelesa po Kanta!

Jeżeli rzeczywiście odkryjemy kiedyś kompletną teorię, z czasem powinna ona stać się zrozumiała dla wszystkich, nie tylko dla kilku specjalistów. Wtedy wszyscy — filozofowie, naukowcy i zwykli ludzie — będziemy mogli wziąć udział w dyskusji, dlaczego istnieje wszechświat, a wraz z nim my sami. Jeżeli znajdziemy odpowiedź, będzie to ostateczny triumf ludzkiego rozumu — poznamy umysł Boga.

Albert Einstein

ROLA EINSTEINA W PROCESIE POWSTANIA BOMBY ATOMOWEJ jest powszechnie znana — podpisał on słynny list do prezydenta Franklina Roosevelta, który spowodował, że rząd Stanów Zjednoczonych poważnie potraktował tę kwestię. Po wojnie Einstein zaangażował się w działania mające na celu zapobieżenie wojnie jądrowej. Nie były to jednak doraźne przedsięwzięcia uczonego wciągniętego w świat polityki. Życie Einsteina było w istocie, jak sam stwierdził, „podzielone między politykę i równania”.

Einstein zaangażował się w działalność polityczną jeszcze w czasie pierwszej wojny światowej, gdy był profesorem w Berlinie. Działania wojenne postrzegał jako odrażające marnotrawienie ludzkiego życia, co spowodowało, że włączył się w antywojenne demonstracje, stał się aktywnym zwolennikiem obywatelskiego nieposłuszeństwa i publicznie popierał odmowę służby wojskowej. Taka postawa nie przyniosła mu uznania ze strony kolegów. Po wojnie działał na rzecz pojednania między narodami i poprawy stosunków międzynarodowych. To także nie przyczyniło się do polepszenia jego wizerunku. Jego polityczna aktywność zaczęła utrudniać mu podróże do Stanów Zjednoczonych, nawet takie, których celem były wykłady naukowe.

Oprócz pacyfizmu, drugą wielką ideą polityczną był dla Einsteina syjonizm. Einstein był z pochodzenia Żydem, aczkolwiek odrzucał biblijną koncepcję Boga. Narastający w społeczeństwie antysemityzm — zarówno przed, jak i w czasie pierwszej wojny światowej — spowodował, że Einstein zaczął się stopniowo identyfikować ze społecznością żydowską i z czasem stał się głośnym zwolennikiem syjonizmu. Niepopularność głoszonych poglądów nie powstrzymała go przed otwartym ich wyrażaniem. Jego teorie stały się obiektem ataków i powstała nawet anty-Einsteinowska organizacja. Jeden z jego przeciwników został skazany (na grzywnę w wysokości sześciu dolarów) za podżeganie do zamordowania Einsteina. Sam Einstein

nie tracił zimnej krwi i gdy ukazała się książka zatytułowana *100 autorów przeciwko Einsteinowi*, spokojnie zareplikował: „Gdybym nie miał racji, wystarczyłby jeden!”.

W 1933 roku do władzy doszedł Hitler. Einstein był wówczas w Ameryce i zadeklarował, że nie wróci do Niemiec. Gdy nazistowska policja płądrowała jego dom i konfiskowała jego rachunek bankowy, w berlińskiej gazecie ukazał się nagłówek: „Dobra wiadomość od Einsteina — nie wraca”. W obliczu zagrożenia ze strony nazistowskich Niemiec Einstein odrzucił swój pacyfizm. W obawie, że niemieccy naukowcy zbudują bombę atomową, Einstein zasugerował, że Stany Zjednoczone powinny rozpocząć pracę nad swoją. Jednak jeszcze przed zdetonowaniem pierwszej bomby atomowej publicznie ostrzegł przed niebezpieczeństwami wojny jądrowej i nalegał na objęcie arsenałów jądrowych międzynarodową kontrolą.

Efekty pokojowych wysiłków Einsteina nie były zbyt poważne ani trwałe i nie przysporzyły mu zbyt wielu zwolenników. Jego zdecydowane poparcie dla syjonizmu zostało jednak docenione, gdyż w 1952 roku proponowano mu prezydenturę Izraela. Einstein odmówił pod pozorem, że uważa się za osobę zbyt naiwną w sprawach polityki. Prawdziwy powód był zapewne inny. Jak sam stwierdził: „Równania są dla mnie ważniejsze, ponieważ polityka jest ważna tylko dzisiaj, a równanie jest wieczne”.

Galileusz

GALILEUSZ, ZAPEWNE BARDZIEJ NIŻ KTOKOLWIEK INNY, jest odpowiedzialny za narodziny nowoczesnej nauki. Filozoficznym podłożem jego głośnego konfliktu z Kościołem katolickim było przekonanie, że człowiek może próbować samodzielnie zrozumieć funkcjonowanie wszechświata, uważnie obserwując otaczającą go rzeczywistość. Galileusz bardzo wczesnie stał się zwolennikiem teorii Kopernika (zgodnie z którą planety krążą wokół Słońca), lecz zaczął ją publicznie popierać dopiero wtedy, gdy odkrył dowody potwierdzające jej słuszność. Pisał o teorii Kopernika po włosku (a nie po łacinie, która była wówczas językiem nauki), dzięki czemu jego poglądy szybko stały się popularne poza środowiskiem uniwersyteckim. Spowodowało to wzburzenie profesorów, którzy w większości byli zwolennikami Arystotelesa i zjednoczyli się przeciwko Galileuszowi, próbując przekonać Kościół katolicki do potępienia kopernikanizmu.

Zaniepokojony Galileusz udał się do Rzymu, aby przekonać kościelne autorytety do swoich racji. Argumentował, że Biblia nie została napisana po to, aby uczyć teorii naukowych, i że w sytuacji konfliktu ze zdrowym rozsądkiem Biblię należy traktować jako alegorię.

Lecz Kościół obawiał się skandalu, który mógłby osłabić jego pozycję w walce z reformacją, więc zareagował bardzo ostro. W 1616 roku kopernikanizm został uznany za „falszywy i błędny”, a Galileuszowi nakazano, aby nigdy więcej „nie bronił i nie głosił” tej doktryny. Galileusz się ugiął.

W 1623 roku papieżem został dawny przyjaciel Galileusza. Uczony natychmiast rozpoczął starania o odwołanie dekretu z 1616 roku. Dekret został utrzymany, lecz Galileusz zdołał uzyskać zgodę na napisanie książki, w której podjął dyskusję na temat obu teorii — Arystotelesa i Kopernika — lecz pod dwoma warunkami. Po pierwsze, nie wolno mu opowiadać się po jednej stronie. Po drugie, dzieło musi zawierać konkluzję, zgodnie z którą człowiek w żadnym przypadku nie może stwierdzić, jak świat działa, ponieważ Bóg mógłby spowodować takie same efekty w sposób

niewyobrażalny dla człowieka, a człowiekowi nie wolno ograniczać wszechmocy Boga.

Książka zatytułowana *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo** została ukończona i opublikowana w 1632 roku z pełną aprobatą cenzorów. Została natychmiast powitana w całej Europie jako literackie i filozoficzne arcydzieło.

Papież, który niebawem uświadomił sobie, że czytelnicy widzą w niej przekonujące argumenty na rzecz kopernikanizmu, pożałował swej zgody na publikację. Książka miała wprawdzie oficjalną zgodę kościelnych cenzorów, lecz przeciwko autorowi wysunięto argument, że złamał dekret z 1616 roku. Galileusz został postawiony przed trybunałem inkwizycji, który skazał go na dożywotni areszt domowy i zmusił do publicznego wyzreczenia się kopernikanizmu. Galileusz ugiął się po raz drugi.

Galileusz pozostał wierzącym katolikiem, lecz jego wiara w niezależność nauki nie została złamana. W 1642 roku, cztery lata przed śmiercią Galileusza, gdy wciąż pozostawał w areszcie domowym, rękopis jego drugiego wielkiego dzieła został przemycony do wydawcy w Holandii. To właśnie owo dzieło, zatytułowane *Discorsi e dimostrazioni matematiche in tomo a due nuove scienze* [Dialogi i dowodzenia matematyczne z zakresu dwóch nowych umiejętności], bardziej nawet niż poparcie Galileusza dla teorii Kopernika stało się zalążkiem nowoczesnej fizyki.

* *Dialog o dwu najważniejszych układach świata: ptolemeuszowym i kopernikowym*, przekł. Edward Ligocki, De Agostini: Altaya, Warszawa 2004.

Isaac Newton

ISAAC NEWTON NIE BYŁ TYPEM SYMPATYCZNEGO, poczciwego naukowca. Jego stosunki z innymi uczonymi były zazwyczaj mało przyjazne, a większość swego dojrzałego życia poświęcił burzliwym sporom. Po publikacji *Principia Mathematica* — bez wątpienia najważniejszej książki z fizyki w historii ludzkości — Newton niezwykle szybko zyskał status prominentnego przedstawiciela naukowego establishmentu. Został wybrany na prezesa Royal Society i jako pierwszy uczoney w dziejach otrzymał tytuł szlachecki.

Jednym z licznych adwersarzy Newtona był John Flamsteed, astronom królewski, który uprzednio dostarczył mu danych niezbędnych do publikacji *Principiów*, lecz później odmawiał ujawniania dalszych informacji na temat swoich obserwacji astronomicznych. Newton, który nie miał zwyczaju akceptowania odmownych odpowiedzi, postarał się, aby przyjęto go w poczet członków komitetu nadzorującego Royal Observatory, a następnie próbował wymusić natychmiastową publikację danych. W końcu udało mu się doprowadzić do rekwizycji wyników Flamsteeda. Publikacją danych zajmował się śmiertelny wróg królewskiego astronoma, Edmond Halley. Flamsteed oddał jednak sprawę do sądu, który zakazał rozpowszechniania skradzionej pracy. Newton wpadł w furję i w odruchu zemsty usunął wszelkie wzmianki dotyczące Flamsteeda z późniejszych wydań *Principiów*.

Jeszcze poważniejszy spór Newton toczył z niemieckim filozofem Gottfriedem Leibnizem. Leibniz i Newton niezależnie opracowali gałąź matematyki, zwaną rachunkiem różniczkowym i całkowym, która stanowi podstawę większości współczesnej fizyki. Newton zrobił to wiele lat wcześniej, lecz opublikował swoje wyniki znacznie później niż Leibniz. Między obu uczonymi rozgorzał spór o prawo pierwszeństwa. W sporze uczestniczyło wielu ówczesnych uczonych, lecz większość publikacji, które broniły Newtona, została napisana jego własną ręką, aczkolwiek ukazywały się one pod nazwiskiem któregoś z jego przyjaciół! W pewnym momencie

Leibniz popełnił błąd i odwołał się do Royal Society, aby rozstrzygnęło spór. Newton, jako prezes towarzystwa, osobiście mianował „niezależny” komitet przypadkowo składający się wyłącznie z jego przyjaciół! To jeszcze nie wszystko — Newton osobiście napisał raport komitetu, w którym oficjalnie oskarżył Leibniza o plagiat, a następnie kazał raport opublikować. Nadal nieusatisfakcjonowany, napisał anonimową recenzję owego raportu i opublikował ją w jednym z periodyków Royal Society. Po śmierci Leibniza Newton miał jakoby stwierdzić, że z wielką satysfakcją „złamał Leibnizowi serce”.

W okresie, gdy toczyły się oba wyżej wymienione spory, Newton opuścił Cambridge i przeniósł się do Londynu. Zarówno w Cambridge, jak i później angażował się w antykatolicką propagandę, a za swoją działalność naukową i polityczną został nagrodzony lukratywną posadą nadzorcy mennicy królewskiej, gdzie jego porywczy charakter i skłonności do pieństwa znalazły ujście w nieco bardziej społecznie akceptowalnej formie. Jako nadzorca, a później kurator mennicy prowadził skuteczną kampanię przeciwko fałszowaniu monet, wysyłając wielu fałszerzy na szubienicę.

Słownik

- absolutne zero:** Najniższa możliwa temperatura; materia w tej temperaturze nie zawiera energii cieplnej.
- akcelerator cząstek:** Urządzenie, które może za pomocą elektromagnesów przyspieszać elektrycznie naładowane cząstki, zwiększając ich energię.
- antropiczna zasada:** Idea, zgodnie z którą widzimy wszechświat taki, jaki jest, bo gdyby był inny, to nie byłoby nas i nie moglibyśmy go obserwować.
- antycząstka:** Każda cząstka materii ma odpowiednią antycząstkę; gdy cząstka zderza się ze swoją antycząstką, obie ulegają anihilacji, zostawiając jedynie energię.
- atom:** Podstawowy element zwykłej materii, składający się z jądra (złożonego z protonów i neutronów) otoczonego przez krążące elektrony.
- ciemna materia:** Materia znajdująca się w galaktykach, gromadach i zapewne także w przestrzeni między gromadami; nie została zaobserwowana bezpośrednio, lecz można ją wykryć dzięki jej grawitacyjnemu oddziaływaniu. Stanowi znaczną część masy wszechświata, być może nawet 90 procent.
- czarna dziura:** Obszar czasoprzestrzeni, z którego nic, nawet światło, nie może uciec, ponieważ grawitacja jest zbyt silna.
- czasoprzestrzeń:** Czterowymiarowa przestrzeń, której punktami są zdarzenia.
- częstotliwość:** Właściwość fali — liczba pełnych cykli na sekundę.
- długość fali:** Odległość między dwoma sąsiednimi grzbietami lub dwiema sąsiednimi dolinami fali.
- dualizm:** Związek między pozornie różnymi teoriami, które dają takie same wyniki fizyczne.
- elektromagnetyczna siła:** Siła działająca między cząstkami obdarzonymi ładunkiem elektrycznym; jedna z czterech podstawowych sił przyrody, druga pod względem wielkości.
- elektron:** Cząstka o ujemnym ładunku elektrycznym; krąży wokół jądra w atomie.
- elektryczny ładunek:** Własność cząstki, dzięki której cząstka odpycha (przyciąga) inne cząstki posiadające ładunek tego samego (przeciwne) znaku.
- elementarna cząstka:** Cząstka, o której sądzimy, że jest niepodzielna.
- energia unifikacji elektroslabej:** Wartość energii (około 100 GeV), powyżej której zanika rozróżnienie między siłą elektromagnetyczną i słabą.

falowo-korpuskularny dualizm: W mechanice kwantowej — koncepcja, zgodnie z którą nie istnieje rozróżnienie między falami i cząstkami; cząstki mogą niekiedy zachować się jak fale, a fale jak cząstki.

faza: Dla fali — położenie w ramach cyklu w określonej chwili: miara odległości od grzbietu lub od doliny fali.

foton: Kwant światła.

gamma promienie: Promienie elektromagnetyczne o bardzo małej długości fali, wytwarzane w radioaktywnych rozpadach lub w zderzeniach cząstek elementarnych.

geodezyjna: Najkrótsza (lub najdłuższa) droga między dwoma punktami.

hipoteza braku brzegów (granic): Koncepcja wszechświata skończonego, lecz pozbawionego granic.

horyzont zdarzeń: Granica czarnej dziury.

jądro: Centralny element atomu zbudowany z protonów i neutronów utrzymywanych razem przez oddziaływanie silne.

jądrowa fuzja: Proces zderzenia dwóch jąder, które łączą się i tworzą jedno cięższe jądro.

kosmologia: Nauka o wszechświecie jako całości.

kosmologiczna stała: Element równań Einsteina, wprowadzony w celu regulowania tempa rozszerzania czasoprzestrzeni.

kwantowa mechanika: Teoria sformułowana na podstawie kwantowej hipotezy Plancka oraz zasady nieoznaczoności Heisenberga.

kwark: Cząstka elementarna (elektrycznie naładowana), na którą działa oddziaływanie silne. Protony i neutrony są zbudowane z trzech kwarków.

magnetyczne pole: Pole odpowiedzialne za siły magnetyczne; wraz z polem elektrycznym tworzy pole elektromagnetyczne.

masa: Ilość materii w ciele; inercja, czyli opór ciała przeciwko przyspieszeniu.

mikrofalowe promieniowanie tła: Promieniowanie pozostałe z ery wczesnego, gorącego wszechświata; obecnie tak znacznie przesunięte ku czerwieni, że rozchodzi się nie jako światło, lecz jako mikrofałe (fale radiowe o długości kilku centymetrów).

most Einsteina-Rosena: Cienka rura czasoprzestrzenna łącząca dwie czarne dziury. Zob. także kanał czasoprzestrzenny.

neutrino: Niezwykle lekka cząstka reagująca wyłącznie na oddziaływanie słabe oraz grawitację.

neutron: Cząstka bardzo podobna do protonu, lecz pozbawiona ładunku; mniej więcej połowę cząstek w jądrach większości atomów stanowią neutrony.

neutronowa gwiazda: Zimna gwiazda, która stanowi pozostałość niektórych supernowych, gdy rdzeń gwiazdy zapada się i tworzy gęstą masę neutronów.

nieoznaczoności zasada: Zasada fizyczna sformułowana przez Heisenberga, zgodnie z którą niemożliwe jest równoczesne określenie dokładnego położenia i prędkości cząstki; im dokładniej znana jest jedna z tych dwóch wielkości, tym mniej dokładnie znana jest druga.

ogólna teoria względności: Teoria Einsteina oparta na idei, zgodnie z którą prawa fizyki powinny być takie same dla wszystkich obserwatorów niezależnie od tego, jak się poruszają. Wyjaśnia działanie siły grawitacji w kategoriach zakrzywienia czterowymiarowej czasoprzestrzeni.

osobliwość: Punkt w czasoprzestrzeni, w którym zakrzywienie czasoprzestrzeni (oraz pewne inne wielkości fizyczne) staje się nieskończone.

Plancka zasada kwantowa: Hipoteza, zgodnie z którą światło (lub jakakolwiek inna fala) może być emitowane lub absorbowane tylko w określonych porcjach — kwantach — których energia jest proporcjonalna do częstotliwości, a odwrotnie proporcjonalna do długości fali.

pole: Właściwość czasoprzestrzeni związana z oddziaływaniami cząstek; pole rozciąga się w całej czasoprzestrzeni, w odróżnieniu od cząstki, która jest zlokalizowana w jednym punkcie w danej chwili.

pozyton: Dodatnio naładowana antycząstka elektronu.

promieniotwórczość: Proces spontanicznej przemiany niektórych jąder atomowych w inne jądra.

proporcjonalność: Stwierdzenie „wielkość Z jest proporcjonalna do wielkości Y ” oznacza, że gdy Y pomnoży się przez pewną liczbę x , to Z również wzrośnie x razy. „Wielkość Z jest odwrotnie proporcjonalna do wielkości Y ” oznacza, że gdy Y pomnoży się przez pewną liczbę x , to Z zmniejszy się x razy.

proton: Cząstka bardzo podobna do neutronu, lecz dodatnio naładowana; mniej więcej połowę cząstek w jądrach większości atomów stanowią protony.

przestrzenny wymiar: Jeden z trzech wymiarów potocznie postrzeganych jako szerokość, długość i wysokość.

przesunięcie ku czerwieni: Spowodowana przez efekt Dopplera zmiana (zmniejszenie) częstotliwości promieniowania gwiazdy, która oddala się od nas; w przypadku światła widzialnego zmiana jest postrzegana jako poczerwienienie.

przyspieszenie: Tempo zmian prędkości obiektu.

radar: Urządzenie wykorzystujące impulsy fal radiowych do wykrywania położenia oddalonych obiektów przez pomiar czasu, jaki pojedynczy impuls potrzebuje, aby pokonać odległość od radaru do obiektu i z powrotem.

rok świetlny (sekunda świetlna): Odległość, jaką światło pokonuje w ciągu jednego roku (jednej sekundy).

silne oddziaływanie: Jedno z czterech podstawowych oddziaływań przyrody, najsilniejsze, lecz o najkrótszym zasięgu. Utrzymuje razem kwarki w protonach i neutronach, a także protony i neutrony w jądrach.

słabe oddziaływanie: Jedno z czterech podstawowych oddziaływań przyrody, trzecie pod względem siły i o bardzo małym zasięgu. Działa na cząstki materii, lecz nie działa na cząstki będące nośnikami oddziaływań.

strun teoria: Teoria fizyczna, w ramach której cząstki są reprezentowane jako fale na strunach. Struny mają długość, lecz nie mają innych wymiarów.

szczególna teoria względności: Teoria Einsteina oparta na idei, zgodnie z którą prawa fizyki powinny być takie same dla wszystkich obserwatorów — niezależnie od tego, jak się poruszają — pod nieobecność zjawisk grawitacyjnych.

tunel czasoprzestrzenny: Cienka rura czasoprzestrzenna łącząca odległe obszary wszechświata. Tunele czasoprzestrzenne mogą również łączyć wszechświaty równoległe lub dziecięce, a także stwarzać możliwości podróży w czasie.

waga (ciężar): Siła wywierana na ciało przez pole grawitacyjne. Jest proporcjonalna do masy, lecz nie jest z nią tożsama.

widmo: częstotliwości składowe, które łącznie dają falę. Tęcza stanowi widzialną część widma promieniowania Słońca.

wielka zunifikowana teoria: Teoria unifikująca oddziaływania elektromagnetyczne, silne i słabe (GUT).

wielki kres: Osobliwość na końcu wszechświata.

wielki wybuch: Osobliwość na początku wszechświata.

wirtualna cząstka: W mechanice kwantowej — cząstka, która nie może być bezpośrednio wykryta, lecz jej istnienie wywołuje mierzalne efekty.

współrzędne: Liczby, które określają położenie punktu w przestrzeni i w czasie.

zdarzenie: Punkt w czasoprzestrzeni, określony przez czas i miejsce.

O autorach

STEPHEN HAWKING jest profesorem matematyki na University of Cambridge, w katedrze Lucasa, którą niegdyś zajmował Newton. Jest autorem między innymi zbioru esejów *Czarne dziury i wszechświaty niemowlęce* oraz popularnonaukowej książki *Wszechświat w skorupce orzecha*.

Fizyk LEONARD MLODINOW, współautor tego wydania, wykładał w Caltechu, pisał scenariusze seriali *Star Trek: The Next Generation* oraz *MacGyver*; jest autorem książek *Euclid's Window* i *Feynman's Rainbow* oraz współautorem serii książek dla dzieci „The Kids of Einstein Elementary”.

Indeks

Numery stron ilustracji są podane kursywą

- absolutna przestrzeń 27, 47
- absolutne zero 70, 136
- absolutny czas 27, 34, 47, 48, 97
- absolutny standard spoczynku 22, 25-26
 - brak standardu, gra w ping-ponga w po-
ciągu, eksperyment myślowy 25-26, 26
- akceleratory cząstek 101, 136
- Alfa Centauri C 10. *Zob. także* Proxima Centau-
ri
- Alpher, Ralph 69-70
- antropiczna zasada 119-120, 136
- antycząstki 67-68, 103-104, 105, 112, 114,
136
- antygravitacja 57, 65
- Arystoteles 11, 12, 14, 15, 17, 22, 25-27, 52,
67, 129, 132
- atomowa bomba 37, 68, 71, 130-131
- atomy 67, 136
 - cząstki składowe 67
 - odkrycie struktury 109
 - orbity dozwolone Bohra 92-94, 92
 - powstawanie 68-69, 71
 - rozpad jąder (promieniotwórczość) 111
 - suma po historiach Feynmana 93-94
 - teoria naukowa, od atomów do galaktyk 19
 - wczesny model, analogia do planet krążą-
cych wokół Słońca 92
 - zjawisko interferencji i nasze interakcje 91,
92
- Augustyn, święty 123
- Bell Telephone Laboratories, New Jersey 59
- Berkeley, biskup George 27
- beryl 69
- Bethe, Hans 69-70
- bliźniąt paradoks 48, 97, 100
- Bohr, Niels 92-94, 92
- Born, Max 109
- Bóg. *Zob. metafizyka*
- brzegowy (lub początkowy) warunek 81, 96, 99
 - hipoteza braku brzegów 129, 137
 - określenie stanu początkowego 84
- California Institute of Technology 116
- Case Western Reserve University 33
- Cavendish, Henry 30
- CERN (European Centre for Nuclear Power)
101
- ciało doskonale czarne
 - problem obliczenia promieniowania 54, 82-
84, 95
 - promieniowanie 54, 82-84
 - widmo 54, 54
- ciemna energia 64
- ciemna materia 63-64, 136
- COBE (satelita Kosmiczny Badacz Tła) 8
- Coulomb, Charles-Augustin de 30
- czarne dziury 65, 72, 74-76, 77, 104, 136
 - czas i grawitacja, eksperyment myślowy 75-
76, 77
 - emisja promieniowania 104
 - horyzont zdarzeń 75
 - liczba i występowanie 75
 - prędkość ucieczki 73-74
 - ogólna teoria względności 75
- czas 97-107
 - absolutny 27, 34, 47, 97
 - bliźniąt paradoks 48, 97, 100
 - czas a grawitacja, eksperyment myślowy 47-
48

- czasoprzestrzeń 34-38, 35, 98
 istnienie Boga poza czasem 123-124
 scenariusz oddziaływania czarnej dziury 75-76, 77
 skończony, z początkiem i końcem 66
 teoria względności 27, 35-38, 44-45, 48, 97, 100
 warunki brzegowe 81, 99
 czasoprzestrzeń 34-38, 35, 136
 gładka i płaska 66
 Gödla model 99
 ogólna teoria względności i linie geodezyjne 40-42
 podróże w czasie a zakrzywienie czasoprzestrzeni 99-100, 103-104, 106
 stała kosmologiczna 57, 65, 114, 137
 tunele czasoprzestrzenne 101-103, 102
 warunki brzegowe 96, 129
 wielki wybuch 66
 wielowymiarowe teorie strun 118-120
 zasada antropiczna 119-120
 zakrzywienie (skurczenie) 66, 95-96, 103, 114
 zunifikowana teoria 95-96
 czasu maszyna 98
 cząstki. *Zob.* elementarne cząstki
 cząstki-nośniki oddziaływań 109-111, 110, 116-117
 częstotliwość 83-84, 136

 Darwina zasada doboru naturalnego 20
 Demokryt 67
 dererminizm naukowy 82, 84, 85, 127-128
 początkowe lub brzegowe warunki 81, 84
 zasada nieoznaczoności 84-85
 deuter (ciężki izotop wodoru) 69
 Dicke, Bob 59, 60
 Dirac, Paul 86, 109
 Dopplera efekt 55, 56, 63
 Droga Mleczna 50-52, 58
 ciemna materia 63-64
 czarne dziury 75
 kandydatka na kolejną supernową w naszej Galaktyce 78
 dualizm (lub podobieństwo) 8, 136

 École Normale Supérieure, Paryż 116
 Eddington, sir Arthur Stanley 124
 Einstein, Albert
 bomba atomowa 130-131
 czas a zasada równoważności 45-46
 czasoprzestrzeń 34-36, 35
 Merkurego orbita 18
 most (tunel czasoprzestrzenny) 103, 137
 Nobla Nagroda 87
 ogólna teoria względności 18-19, 21, 38, 39-40, 43, 44-45, 47-48, 58, 74, 79, 95, 114, 124, 137
 stała kosmologiczna 57, 65, 114, 137
 szczególna teoria względności 34-36, 37, 45, 48
 teoria eteru 34
 teoria kwantowa 87
 wielki wybuch 66
 w Institute for Advanced Study 99
 względność prędkości, myślowy eksperyment 31-32, 32
 zunifikowanej teorii poszukiwania 108-114
 życie i polityka 130-131
 Einsteina-Rosena most 103. *Zob. także* tunel czasoprzestrzenny
 eksperyment z dwiema szczelinami 89-90, 91, 92
 elektromagnetyzm
 dodatnie i ujemne ładunki 111
 fale, promieniowanie gorącego ciała, obliczenia 82-83
 fotony 111
 kwanty 83, 87-88
 pole 30, 113
 siła 30, 111, 114, 136
 zasada nieoznaczoności zastosowana do pola elektromagnetycznego 112, 113-114
 elektrony 67-71, 68, 75, 85, 90, 92-93, 136
 dozwolone i niedozwolone orbity Bohra 92-93, 92
 eksperyment z dwiema szczelinami 89-90, 91, 92
 fale na orbitach atomowych 92-93, 92
 Feynmana formalizm 93-94, 94
 interferencja 92
 wirtualne pary 112, 113
 elektroslabej unifikacji energia 136
 elektryczność 30, 112
 elektryczny ładunek 111, 136
 elementarne cząstki 67, 68, 136
 akceleratory 101, 136
 antycząstki 67-68, 114
 dualizm falowo-korpuskularny 72, 88-89, 93-94, 137
 eksperyment z dwiema szczelinami 89-90,

- 91, 92
- elektrony 67-71, 68, 75, 85, 90, 92-94
- Feynmana formalizm 93-94, 94
- fotony 67-70, 68, 74, 83-84, 111
- gluon, 112, 116
- grawitacja a ograniczenia rodzajów cząstek 123
- interferencja 88-90, 92, 92
- kwantowy stan 86
- kwark 67, 111-112, 114, 123
- lewoskrętność 118
- neutrino, 67-69
- neutrony 67-70, 116
- nośniki oddziaływań 109-111, 110, 116-117
- podróże w czasie 104, 105, 106
- powstawanie w wielkim wybuchu 67
- prędkość i bariera prędkości światła 101
- protony 67-70, 116
- silne oddziaływanie 69
- struktura, przewidywanie 123
- suma po historiach i dualizm falowo-korpuskularny 93, 95, 103-104, 107
- temperatura 66-69, 68
- ujemna gęstość energii 103
- w atomie 67-68
- wirtualne 109-110, 112, 113
- wymiana cząstek w mechanice kwantowej 109-110, 110
- eliptyczne galaktyki 71
- Empedoklesa teoria 17
- energia
- ciemna energia 64
 - elektromagnetyczna 84-85
 - energia światła a częstotliwość fali 84
 - kinetyczna 37
 - ujemna gęstość energii 103
 - wirtualnych cząstek 113
- epicykle 14
- eter 33-35
- Exposition du système du monde* (Laplace) 74
- fale 30
- częstotliwość 83
 - długość fali 30-31, 31, 55, 136
 - Dopplera efekt 55-56, 56, 63
 - eksperyment z dwiema szczelinami 89-92, 90, 91
 - eter 33-35
 - falowo-korpuskularny dualizm 72, 88-89, 93, 137
 - faza 137
- interferencja 88-90, 91, 92
- kolory baniek mydlanych 88
- kwanty (pakiety) 83, 88
- prędkość 37
- suma po historiach i dualizm falowo-korpuskularny 93-95
- światło jako fala 72, 74
- światło widzialne 55
- w fazie i w przeciwfazie 89, 89
- zob. także* światło
- faza 137. *Zob. także* fale
- Fermilab 101
- Feynman, Richard 8
- diagram kreacji wirtualnej pary cząstka/antycząstka 112
 - diagramy w teorii pola i teorii strun 117
 - podróże w czasie cząstek elementarnych 103-104, 105, 107, 116
 - suma po historiach w mechanice kwantowej 93, 95, 103-104, 107
- Flamsteed, John 134
- foton 67-70, 68, 74, 83-84, 83, 111, 114
- unifikacja fizyki *zob. z*unifikowana teoria
- Friedmann, Alexander 58-64
- pierwszy model 62-63, 66
 - drugi model 62-64
 - trzeci model 62-64
- galaktyki 50
- ciemna materia 63-64
 - czarne dziury 75-76
 - Droga Mleczna 50, 52, 58
 - eliptyczne 71
 - liczba 52
 - odległości 55-57
 - przesunięcie ku czerwieni 56, 59-60
 - spiralne 50
 - średnia liczba gwiazd 52
- Galileusz 14, 22-23, 25
- eksperyment ze spadającymi ciałami 22-23
 - życie i proces 132-133
- gamma promienie 30, 75, 137
- Gamow, George 59, 60, 69-70
- geodezyjna 39-42, 40, 41, 44, 137
- Getynga, uniwersytet 109
- Glashow, Sheldon 112
- gluon 112, 116
- Gödel, Kurt 98, 99, 122
- twierdzenie o niezupełności 98-99
- grawitacja
- charakterystyka siły 110

- czas a grawitacja, eksperyment myślowy 46-47
 doświadczenie Galileusza 22-23
 gwiazd 15, 25, 57
 krytyczna prędkość ucieczki 57, 70
 masa ciała 19, 23-25, 24, 62-64
 odległość ciał 25, 37
 odkrycie przez Newtona 15
 ogólna teoria względności 38-40, 43, 44-45, 79, 95, 114
 ograniczenia rodzajów cząstek elementarnych 123
 rozszerzanie wszechświata 56-57, 62-64
 rotacja materii we wszechświecie 71-72
 ruch gwiazd, planet oraz ciał na Ziemi 15
 scenariusz oddziaływania czarnej dziury 75-78, 77
 siły pływowe 77
 supergrawitacja 115-116, 122
 teoria Newtona 17-18, 37-38, 42, 46-47, 72, 81, 86, 124
 teoria strun 115-116
 trudności w poszukiwaniach kwantowej teorii grawitacji 113-116
 zachowanie światła 76-77, 78. *Zob. także*
 czarne dziury 43, 44, 72-74, 76
 zakrzywienie przestrzeni 62
 zakrzywiona przestrzeń 39, 41, 43, 44, 95
 zasada równoważności 45-46
 zunifikowana teoria 18-21, 80, 95-96, 108-125, 128-130
 grawitacji siła 110
 Grecja starożytna
 o atomach i materii 67
 o naturze wszechświata 11-14
 o planetach 12
 Green, Mike 118
 Guth, Alan 70
 gwiazdy
 analiza widma 53-55, 54
 blask a reakcje fuzji jądrowej 72
 czarne dziury 72-77
 galaktyki 50
 grawitacyjne przyciąganie 24, 57, 74
 Herschela katalog 50-51
 Hubble'a klasyfikacja 52
 jasność 52
 kandydatka na kolejną supernową w Drodze Mlecznej 78
 kolor 53
 liczba 52
 najbliższa Ziemi 9
 natura 9
 ochładzanie 72
 odległości 10, 50, 52
 odległości pomiary 50, 51, 52
 ogólna teoria względności 74
 paralaksa 50, 51, 52
 powstawanie 71
 prędkość ucieczki 73, 73
 promieniowanie ciała doskonale czarnego 54-55, 56
 przesunięcie ku czerwieni 55-56, 56
 rozmiary, temperatura, wiek 72
 ruch 15-16
 „strefy życia” 78
 supernowe 76-78
 temperatura 9, 52-53, 72
 ugięcie światła 74
 widzialne 52-53
 występowanie pierwiastków, pomiary 54-55
 żółte nadolbrzymy 78
 zob. także poszczególne gwiazdy; Słońce
 Halley, Edmond 134
 Harvard University 112
 Hawking, Stephen 140
 Heisenberg, Werner 84-86
 hel 69-72
 Herschel, sir William 50
 hipoteza braku brzegów (granic) 129, 137. *Zob. także* zunifikowana teoria
 Hiroszima 37
 Hubble, Edwin 52-53, 56, 58, 61
 Hubble'a Kosmiczny Teleskop 8, 75
 Imperial College, Londyn 112
 Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey 99
 interferencja 88-92, 90
 eksperyment z dwiema szczelinami 89-90, 90, 91
 kolory baniek mydlanych 88-89
 izotropowy las 58, 59
 jasność gwiazd 50
 obliczenia 50, 52-53
 jądro 137
 rozpad promieniotwórczy 111
 jądrowa energia 21
 jądrowej fuzji reakcje 137

- Jeans, sir James 82
 Johnson, Samuel 27
 Jowisz 12, 14, 50
 księżyc 14
 zaćmienia księżyców 28-30, 29
- Kepler, Johannes 14-15
 kinetyczna energia 37
 Kirchhoff, Gustav 53
 kolory baniek mydlanych 88-89
 koło wielkie 39, 40
 Kopernik Mikołaj 14-15
 model wszechświata 14-15, 132-133
 kosmiczny szum (promieniowanie) tła 59, 64, 70
 kosmologia 136. *Zob. także wszechświat*
 kosmologiczna stała 59, 64, 70
 Kościół katolicki
 Galileusz 132-133
 model nieba Ptolemeusza 14
 Kraba, mgławica 76
Krótką historią czasu (Hawking) 7
 Księżyc
 eksperyment z piórkiem i młotkiem 23
 odległość, pomiary 36
 Ptolemeusza model 13-14, 13
 kwantowa teoria, kwantowa mechanika 19-21, 78-80, 137
 eksperyment z dwiema szczelinami 89-90, 91, 92
 falowo-korpuskularny dualizm 72, 88-90
 Feynmana formalizm 93-94, 94
 formalizm teorii 86-88
 kwantowy stan cząstek 88
 nieoznaczoności zasada 84-86, 88, 94-95, 99, 103, 109, 113, 115, 128
 nieoznaczoności zasada zastosowana do pola elektromagnetycznego 112, 113-115
 nieskończoności 114
 Plancka stała 85
 podróże w czasie 106
 renormalizacja 114-115
 rozmyte kwantowe położenie 87
 rozwiązanie problemu promieniowania ciała doskonale czarnego (teoria Plancka) 84-85, 88, 95
 sukcesy i zastosowania 94-95
 suma po historiach 93, 95, 103-104, 107
 trudności w poszukiwaniach teorii grawitacji 113-116
 ujemna gęstość energii 103
 wymiana cząstek 109-112, 110
 zależność energii światła od koloru 83-84
 zunifikowana teoria (kwantowa teoria grawitacji) 21, 80, 95-96, 108-125, 128
 kwarki 67, 111-112, 114, 123, 137
- Laplace, markiz Pierre Simon de 74, 81-82, 84-85, 127
 Leibniz, Gottfried 134-135
 lit 69, 72
 Lorentz, Hendrik 33
- magnetyzm i pole magnetyczne 15, 30 112, 137
 makromolekuły 79
 Mars 12, 50
 masa 137
 cząstki elementarne 69-70
 energia kinetyczna 37
 gęstość wszechświata 63-64
 grawitacja 18, 23-25, 24, 45
 prędkość światła 37
 zasada równoważności 45-46
 Massachusetts Institute of Technology (MIT) 70
 Maxwell, James Clerk 30-34, 37, 112
 Merkury 9, 12, 42, 44, 42
 ogólna teoria względności Einsteina 18, 42-44, 42
 teoria grawitacji Newtona 18
 metafizyka (lub religia)
 absolutny Bóg 27
 Bóg a zasada nieoznaczoności 123
 istnienie Boga poza czasem 123
 natura Boga 127-129
 naukowy determinizm a omnipotencja Boga 82, 127
 początkowy stan wszechświata 18, 96, 127-128
 stwórcy rola 96, 127-128
 zunifikowana teoria a omnipotencja Boga 123
- Michell, John 73-74
 Michelson, Albert 33
 Michelsona–Morleya eksperyment 34-35
 mikroelektronika 21
 mikrofałe 30, 59, 70
 kosmiczne promieniowanie tła 59-60, 64, 137
 molekuly
 przewidywania mechaniki kwantowej 94-95
 w szklance wody 82

- Morley, Edward 33
 mydlane bańki, kolory 88-89
- naukowe prawa
 niepełne teorie 108
 obecny stan wiedzy 124
 prowizoryczne czynniki 108. *Zob. także* stała kosmologiczna
 rozwój 127-128
 życie a prawa przyrody 108-109
- naukowe teorie
 dwa warunki 17
 natura 17-18
 naukowy determinizm 82, 84, 85, 127-128
 Ockhama brzytwa 86
 od atomów do galaktyk 18-19
 osobliwości 79-80, 95-96, 128
 początkowe lub brzegowe warunki 81, 84, 96
 poszukiwania zunifikowanej teorii 18-21, 80, 94-95, 108-125, 126-129
 poznanie rozumowe a eksperymentowanie 22-23
 trudności w poszukiwaniach kwantowej teorii grawitacji 113-116
 twierdzenie o zupełności 99
 wczesne teoretyczne próby opisu wszechświata 126-127
zob. także poszczególne teorie
- neutrino 67-69, 111, 137
 neutron 67-70
 neutronowa gwiazda 137
 Newton, sir Isaac 15 30
 absolutna przestrzeń 26-27
 absolutny czas 27
 analiza widma światła 53-55
 drugie prawo 23, 46
 Galileusz i prawa ruchu 23
 kwestia absolutnego standardu spoczynku 25-26, 26
 pierwsze prawo 23
 światło jako strumień cząstek 72
 teoria grawitacji 15, 17-19, 22-25, 24, 37-38, 42, 57, 74, 81
 wszechświat 22-27, 24, 26, 57
 życie i charakter 134-135
- nieoznaczoności zasada 84-86, 88, 94-95, 109, 112, 113, 115, 128, 137
 zastosowana do pola elektromagnetycznego 112, 113-114
 nieskończoności 114, 118
- O niebie* (Arystoteles) 11
 Ockhama brzytwa 86
 ogólna teoria względności. *Zob. teoria względności*
 Oppenheimer, Robert 74
 orbity ciał niebieskich 12, 14-15, 17-18, 24-25, 40-42, 42
 osobliwość 79-80, 95-96, 103, 128, 137
- paralaksa (światła gwiazd) 50-52, 51
p-brany 122
 Peebles, Bob 59, 60
 Penzias, Arno 59, 60, 64, 70
 Philosophical Transactions of the Royal Society of London 73
 pierwiastki
 ciężkie 72, 78
 ciężkie pierwiastki a supernowe 78
 Empedoklesa teoria 17
 stworzenie 69-72, 78
 Planck Max 83-84
 teoria promieniowania ciała doskonale czarnego (hipoteza kwantu) 84-85, 88, 95
 Plancka energia 124
 Plancka stała 85
 planety (i ich księżyce)
 astronomia Greków 12
 kopernikański model 14-15
 obserwacje 50
 odległości 10
 ogólna teoria względności 18, 40, 42
 orbity 12-14, 18, 25, 42, 42
 przewidywania ruchów planet a determinizm 82
 Ptolemeusza model 13-14, 13
 teoria grawitacji Newtona 15, 17-19, 25, 42
zob. także poszczególne planety
- podczerwone promieniowanie 30, 55
 podróże w czasie 97-104, 106-107
 brak dowodów 106-107
 cząstek elementarnych 104, 105, 106
 do przeszłości 101-103
 do przyszłości 97-99
 hipoteza alternatywnych historii 107
 hipoteza ochrony chronologii 107
 hipoteza spójnych historii 106
 paradoksy i problemy logiczne 106-107
 szybciej od światła 98-100
 tunele czasoprzestrzenne 101-103
 wolna wola 106

- Poincaré, Henri 34
- pole 138
- Popper, Karl 17
- Powrót do przyszłości* (film) 107
- pozyton 67-69, 68, 138
- prędkość
- Dopplera efekt 55, 56, 63
 - masa 37
 - Maxwella teoria 30-34, 37
 - Newtona drugie prawo 23
 - Newtona pierwsze prawo 23
 - podróż szybciej od światła 100-102, 102
 - światła 10, 28-34, 74
 - teoria względności 34
 - ucieczki 73-74
- Princeton University, New Jersey 59
- Principia Mathematica* (Newton) 15, 30
- prawa ruchu 23
- promień X 30, 35
- promieniotwórczość 111, 138
- proporcjonalność (definicja) 138
- proton 67-70, 116, 138
- prowizoryczne czynniki 108, 114-115
- Proxima Centauri 10, 36, 50, 100-102
- pryzmat 53
- przestrzeń
- absolutna przestrzeń 27, 47
 - a czas 27
 - Friedmanna modele 62-64
 - geodezyjne linie 39-42, 40, 41
 - gra w ping-ponga w pociągu, eksperyment myślowy 25-26, 26, 31-32, 32
 - płaska 62-63
 - rozmyte kwantowe położenie 87
 - warunki brzegowe 81
 - współrzędne położenia punktu 34, 35, 36
 - wymiar przestrzenny 138
 - zakrzywiona 39, 41-42, 43, 44, 62-63
- przesunięcie ku czerwieni 55-56, 138
- przyspieszenie 136
- drugie prawo Newtona 23
- Ptolemeusz 52
- model nieba 13-14, 13
- Queen Mary College, Londyn 118
- rachunek różniczkowy i całkowy 134
- radar 138
- radiowe fale 30-31, 55
- teoria Maxwella 30-31, 33-34
- Rayleigh, lord (John William Strutt) 82
- renormalizacja 114-115
- Ro Kasjopei 78
- Robertson, Howard 61
- rok świetlny (sekunda świetlna) 10, 138
- Roosevelt, Franklin D. 130
- Rosen, Nathan 103
- rotacja materii we wszechświecie 70-72
- Rømer, Ole Christensen 28-30, 73
- ruch ciał
- Arystotelesa wiara w absolutny standard spoczynku 22
 - jako energia kinetyczna 37
 - Newtona pierwsze prawo 23
 - Newtona drugie prawo 23
 - Newtona teoria grawitacji 15, 22
 - orbity ciał niebieskich 12, 14-15, 17-18, 24-25, 40-42, 42
- Russell, Bertrand 9
- Salam, Abdus 112
- Saturn, 12, 50
- Scherk, Joël 116
- Schrödinger, Erwin 86
- Schwarz, John 116, 118
- Scott, David R. 23
- silne oddziaływanie jądrowe 69, 112, 116, 118, 138
- siły (nośników oddziaływań)
- diagramy w teorii pola i teorii strun 117
 - elektromagnetyczne 111, 136
 - grawitacji 110. *Zob. także* grawitacja nieskończoności 114-115
 - renormalizacja 114-115
 - silne oddziaływanie jądrowe 112, 138
 - słabe oddziaływanie jądrowe 111, 138
- Skorpion-Centaura asocjacja 78
- słabe oddziaływanie jądrowe 111-112, 138
- Słońce 9
- ciężkie pierwiastki 78
 - odległość od Ziemi 50, 77
 - ewolucja 72
 - model Kopernika 14-15
 - temperatura 69
 - teoria Maxwella 37
 - teoria Newtona 37-38
 - zaćmienie a testy teorii Einsteina 40-44, 43
- Spielberg, Steven 107
- spiralna galaktyka 50
- „strefy życia” 78
- strun teorie 8, 115-116, 117, 118-122, 138
- dualizmy 122

- historia 116, 118
- nieskończoności 118
- otwartych 115
- p*-brany 122
- problemy z większą liczbą wymiarów przestrzennych 119-120, 121
- problemy z wieloma teoriami 121-122
- zamkniętych 115
- zasada antropiczna 119-120
- wielowymiarowe 118-120
- suma po historiach 93, 95, 103-104, 107
- supergrawitacja 115-116, 122
- supernowe 76-78
 - częstość występowania 77-78
 - kandydatka na kolejną supernową w naszej Galaktyce 78
 - pozostałości widziane z Ziemi 76-77
 - wymierania na Ziemi 77-78
- szczególna teoria względności *zob.* teoria względności
- światło
 - analiza widma 53-55, 54
 - częstotliwość fali 83
 - długość fali 30-31, 31, 55
 - eksperyment z dwiema szczelinami 89-90, 90, 91
 - energia, zależność od koloru 83-84, 83
 - falowa teoria 72, 74
 - falowo-korpuskularny dualizm 72
 - fotony 67-70, 68, 74, 83-84, 83, 111, 114
 - kolory baniek mydlanych 88-89
 - korpuskularna teoria 72-74
 - kwanty 83
 - Maxwella teoria 30-32, 37, 112
 - Michelsona–Morleya eksperyment 34-35
 - podróż szybsza od światła 103-104, 106
 - prędkość 10, 28, 30-34, 75
 - prędkość i odkrycie Rømera 28-30
 - propagacja 30
 - przesunięcie ku czerwieni 55-56
 - rozwiązanie problemu promieniowania ciała doskonale czarnego 84, 95
 - teoria eteru 33-35
 - rok świetlny (sekunda świetlna) 10, 138
 - teoria względności 34
 - ugięcie, ogólna teoria względności Einsteina 41, 43, 44, 74
 - właściwości światła a ruchy ciał 27
 - widzialne 30-31, 55
 - zaćmienia księżyców Jowisza 28-30, 29
- temperatura 66
 - absolutnego zera 70, 136
 - analiza widma światła i pomiary temperatury 53-55
 - cząstki 67-68
 - gwiazd 9, 52-53
 - powstawanie pierwiastków 67-68, 71-72
 - w i po wielkim wybuchu 66-67, 69
- teoria względności
 - czas 100-101
 - czas i zasada równoważności 45-46
 - czasoprzestrzeń 35-36, 35
 - myślowy eksperyment 31-32, 32
 - ogólna teoria względności 18-19, 38, 39-40, 42, 42, 43, 44-45, 48, 58, 74, 95-96, 114, 124, 137
 - orbita Merkurego 18, 42
 - szczególna teoria względności 37, 45, 48, 138
 - ugięcie światła 43, 44-45, 74
 - zaćmienia a testy teorii Einsteina 40-44, 43
- tlen 72
- tunele czasoprzestrzenne 101-103, 102
- twierdzenie o zupełności 99
- tytanu tlenek 78
- ucieczki prędkość 62, 73, 73
- UFO 114
- ultrafioletowe światło 30, 55
- Uran 78
- waga 138
- Walker, Arthur 61
- Webikół czasu* (Wells) 97
- Weinberg, Steven 112
- Wells, H.G. 97
- Wenus 12, 50
- Wheeler, John 72
- widmo 138
 - analiza 53-55, 54
- wielka zunifikowana teoria (GUT) 113, 139
- wielki kres 128, 139
- wielki wybuch 66, 68, 71, 80, 128, 139
 - gorący model 69-70
- Wilson, Robert 59, 60, 64, 70
- wirtualne cząstki 109-111, 112, 113-114, 139
 - energia 114
- Wittgenstein, Ludwig 129
- wodór 71, 99
 - atomu model 93
 - mechanika kwantowa 94-95
- współrzędne 34, 35, 36, 139

wszechświat

a ogólna teoria względności 18-19, 38, 39-40, 42, 42, 43, 44-45, 48, 58, 74, 79
ciemna materia 63-64
dawne poglądy (nieskończona wieża z żółwi) 9, 126, 127
determinizm naukowy 82
ewolucja poglądów naukowych na temat natury wszechświata 9-16
filozofia 129
Friedmanna założenia 58-59, 62-65
gęstość 62-65
Gödla wirujący model świata 99
grawitacja 57, 62
helu zawartość 69-72
jednorodność powszechna 58-60, 58, 129
Kopernika model 14-15, 132-133
kosmiczny szum (promieniowanie) tła 59-60, 64
mechanika kwantowa 19-20
Newtona 22-27, 24, 26, 57
nieskończona natura 15
obecne tempo rozszerzania 62-63
osobliwości 128
przestrzeń i czas 48-49
początkowe tempo rozszerzania 68-69
początkowy stan 18, 66, 95-96
prawa 19-20
przesunięcie ku czerwieni a rozszerzanie 55-56
przyspieszenie rozszerzania 64-65
Ptolemeusza model 13-14, 13
rozmiary 19
rotacja materii we wszechświecie 71-72
rozszerzanie 57-58, 60-65, 61, 79
skończone rozmiary 49, 96, 128. *Zob. także wielki wybuch; wielki kres*
statyczny, błędne poglądy 57-58
trzy scenariusze rozszerzania 62-64
tunele czasoprzestrzenne 102-103, 102
wiek 66
wielki kres 128
wielki wybuch (pochodzenie) 66-68, 70-71, 79, 96, 128
współczesny obraz 52, 79, 126-128
zakrzywiona przestrzeń 39, 41-42, 44
zmiany w czasie 17-18
zunifikowana teoria 18-19, 95-96

wymiana cząstek 110

względność odległości, absolutny standard spoczynku, eksperyment myślowy 25-26, 26
zasada nieoznaczoności 84-86, 88, 94-95, 99, 103, 109, 112, 113, 115, 128
zasada równoważności 45-46
zdarzenie 137
zdarzeń horyzont 75, 137
zdobywcy Nagrody Nobla 33, 60, 87, 112
zegary i teoria względności 46-47
biologiczne, paradoks bliźniąt 48, 97, 100
Ziemia
atmosfera początkowa 78
cień 11
ciężkie pierwiastki, pochodzenie 78
kolo wielkie (linia geodezyjna) 39, 40, 41
odkrycie kulistego kształtu Ziemi przez Greków 11-13, 12
Ptolemeusza model 13-14, 13
rozwój życia 78-79, 108
wiara w płaską Ziemię 11
wiara w Ziemię jako centrum wszechświata 12-13
wymierania i supernowe 76-78
złoto 78
zunifikowana (jednolita) teoria 18-21, 80, 94-95, 108-125
koncepcja wielu różnych sformułowań 122-123
konsekwencje 124-125
nieskończoności i renormalizacja (prowizoryczne czynniki) 114-115
paradoks 20
strun teorii 115-116, 117, 118-122
supergrawitacja 115-116
trzy możliwości 123
życie
dopasowanie natury do stworzenia życia 108
ewolucja 79
makromolekuły 79
na Ziemi, rozwój 78-79
„strefy życia” 78
trzy wymiary przestrzenne i jeden wymiar czasowy niezbędne dla życia 118-120
zasada antropiczna 119-120