
Neil deGrasse Tyson
Michael A. Strauss, J. Richard Gott
WITAMY
WE WSZECHŚWIECIE
PODRÓŻ ASTROFIZYCZNA
ZYSK I S-KA
WYDAWNICTWO


Witamy we Wszechświecie
Podróż astrofizyczna
J. Richard Gott
Neil deGrasse Tyson
Michael A. Strauss

Neil deGrasse Tyson, Michael A. Strauss, J. Richard Gott
Witamy we Wszechświecie. Podróż astrofizyczna

Tytuł oryginału
Welcome to the Universe: An Astrophysical Tour

ISBN 978-83-8116-697-3

Copyright © 2016 by Neil deGrasse Tyson, Michael A. Strauss, and J. Richard Gott
All rights reserved

Copyright © 2019 for the Polish translation by Zysk i S-ka Wydawnictwo s.j., Poznań

Redaktor prowadzący
Dariusz Wojtczak

Redakcja
Zofia Domańska

Konsultacja naukowa
dr Sławomir Brzezowski (UJ)
dr hab. Lech Sokołowski (UJ)

Projekt graficzny okładki
Krzysztof Kibart
www.designpartners.pl

Opracowanie graficzne okładki
Grzegorz Kalisiak

Projekt graficzny i opracowanie techniczne bloku książki
Barbara i Przemysław Kida

Wydanie 1

Zysk i S-ka Wydawnictwo
ul. Wielka 10, 61-774 Poznań
tel. 61 853 27 51, 61 853 27 67
dział handlowy, tel./faks 61 855 06 90
sklep@zysk.com.pl
www.zysk.com.pl

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejszy plik jest objęty ochroną prawa

autorskiego i zabezpieczony znakiem wodnym (watermark).

Uzyskany dostęp upoważnia wyłącznie do prywatnego użytku. Rozpowszechnianie całości lub fragmentu niniejszej publikacji w jakiejkolwiek postaci bez zgody właściciela praw jest zabronione.

Konwersję do wersji elektronicznej wykonano w Zysk i S-ka Wydawnictwo.

Spis treści

Okładka

Strona tytułowa

Strona redakcyjna

Dedykacja

Wstęp

Część I – Gwiazdy, planety i życie

- 1 – Rozmiary i skale Wszechświata
- 2 – Od dziennego i nocnego nieba do planetarnych orbit
- 3 – Prawa Newtona
- 4 – Jak gwiazdy emitują promieniowanie i energię (I)
- 5 – Jak gwiazdy emitują promieniowanie i energię (II)
- 6 – Widma promieniowania gwiazd
- 7 – Życie i śmierć gwiazd (I)
- 8 – Życie i śmierć gwiazd (II)
- 9 – Dlaczego Pluton nie jest planetą
- 10 – Poszukiwanie życia w Galaktyce

Część II – Galaktyki

- 11 – Ośrodek międzygwiezdny

12 – Nasza Droga Mleczna
13 – Wszechświat galaktyk
14 – Ekspansja Wszechświata
15 – Wczesny Wszechświat
16 – Kwazary i supermasywne czarne dziury
Część III – Einstein i wszechświat
17 – Droga Einsteina do teorii względności
18 – Konsekwencje szczególnej teorii względności
19 – Ogólna teoria względności Einsteina
20 – Czarne dziury
21 – Kosmiczne struny, tunele czasoprzestrzenne i podróże w czasie
22 – Kształt Wszechświata i Wielki Wybuch
23 – Inflacja i ostatnie odkrycia kosmologii
24 – Nasza przyszłość we Wszechświecie
Podziękowania
Dodatek 1 – Wyprowadzenie E=mc2
Dodatek 2 – Bekenstein, entropia czarnych dziur i informacja
Literatura uzupełniająca
Podziękowania tłumacza

Pamięci Lymana Spitzera Jr., Martina Schwarzschilda,
Bohdana Paczyńskiego i Johna Bahcalla,
którzy pozostawili niezatarte piętno na nas trzech,
na naszych badaniach w astrofizyce i na naszej edukacji.

Wstęp

Gdy urodziła się moja wnuczka, Allison, jedną z pierwszych rzeczy, które jej powiedziałem, było powitanie, które Neil Tyson wygłaszał wielokrotnie na antenie radia i telewizji. „Welcome to the Universe" stało się swego rodzaju wizytówką Neila. Gdy przychodzisz na świat i stajesz się obywatelem całego Wszechświata, warto rozejrzeć się dokoła i zainteresować swoim otoczeniem.

Neil usłyszał wołanie Wszechświata w trakcie wizyty w Hayden Planetarium w Nowym Jorku, gdy miał zaledwie dziewięć lat. Jako miejskie dziecko po raz pierwszy zobaczył cuda nocnego nieba, wyświetlone wewnątrz kopuły planetarium. Zdecydował wtedy, że będzie astronomem. Dzisiaj jest dyrektorem tej instytucji.

Wszyscy jesteśmy dziećmi Wszechświata. Wodór w twoim ciele powstał wraz z narodzeniem samego Wszechświata, natomiast inne pierwiastki powstały we wnętrzach odległych, dawno umarłych gwiazd. Gdy korzystamy z telefonu, powinniśmy dziękować astronomom. Telefonia komórkowa powstała dzięki równaniom teorii Maxwella, a teoria Maxwella została potwierdzona dzięki temu, że astronomowie potrafili zmierzyć prędkość światła. Technologia GPS w telefonie, która pomaga nam nawigować, opiera się na Einsteinowskiej ogólnej teorii względności, została potwierdzona przez astronomów, którzy zmierzyli ugięcie światła przechodzącego w pobliżu Słońca. Czy wiesz, że fizyka czarnych dziur określa graniczną ilość informacji, jaka może zostać zapisana na 6-calowym dysku komputerowym? I z nieco innej beczki — pory roku na naszej planecie wynikają bezpośrednio z nachylenia osi Ziemi względem płaszczyzny jej orbity wokół Słońca.

Celem tej książki jest zaznajomienie czytelnika z Wszechświatem, w którym żyjemy. Pomysł jej napisania pojawił się, gdy prowadziliśmy na Uniwersytecie Princeton wykład na temat Wszechświata dla studentów, których głównym kierunkiem nie były nauki ścisłe i dla których był to zapewne jedyny wykład z nauk ścisłych. Do prowadzenia tego wykładu Neta Bahcall, nasza koleżanka i zarazem dyrektor studiów pierwszego stopnia, wybrała Neila deGrasse Tysona, Michaela Straussa i mnie. Talent Neila w wyjaśnianiu nauki nienaukowcom jest powszechnie znany, Michael właśnie odkrył najdalej położony kwazar, a ja niedawno otrzymałem nagrodę dla wyróżniającego się wykładowcy, przyznaną przez prezydenta Uniwersytetu Princeton. Wykład został szeroko rozreklamowany i przyciągnął taką liczbę studentów, że nie mogli się pomieścić w naszym budynku i musieliśmy się przenieść do największej sali wykładowej na wydziale fizyki. Wykłady Neila to „Gwiazdy i planety", Michaela „Galaktyki i kwazary", a moje „Einstein, teoria względności i kosmologii". Wzmianka o naszym wykładzie pojawiła się w czasopiśmie „Time", gdy „Time" wyróżnił Neila jako jedną ze stu najbardziej wpływowych osób na świecie w 2007 roku. Dzięki tej książce poznasz także Neila w roli profesora, uniwersyteckiego wykładowcy uczącego studentów astronomii.

Po kilku latach zdecydowaliśmy się zawrzeć główne idee wykładu w postaci książki dla czytelników, którzy chcieliby poznać Wszechświat na nieco wyższym poziomie.



ILUSTRACJA 1. Autorzy, od lewej: Michael Strauss, Richard Gott, Neil deGrasse Tyson

Photo credit: Princeton, Denise Applewhite

Książka poprowadzi czytelnika na wycieczkę po Wszechświecie oglądanym z punktu widzenia astrofizyka, czyli z punktu widzenia kogoś, kto próbuje zrozumieć, co się dzieje. Powiemy ci, jak Newton i Einstein dokonali swoich największych odkryć. Na pewno wiesz, że Stephen Hawking jest sławnym uczonym[1]. A my powiemy ci, co uczyniło go sławnym. Eddie Redmayne tak przekonująco wcielił się w głównego bohatera we wspaniałym filmie o Hawkingu, *Teoria wszystkiego*, że ta rola przyniosła mu Oscara dla najlepszego aktora. Film ukazuje Hawkinga, który swojego największego odkrycia dokonuje, wpatrując się w płomienie kominka. My opowiemy ci o tym, czego w filmie nie ma: jak Hawking początkowo zignorował pracę Jacoba Bekensteina, ale ostatecznie nie tylko potwierdził, lecz także wyprowadził z niej całkiem nowy wniosek. To ten sam Bekenstein, który odkrył graniczną ilość informacji, jaka może zostać zapisana na 6-calowym dysku komputerowym. Jedno wiąże się z drugim. W tej książce spośród wszystkich tematów w całym Wszechświecie skupimy się na tych, które są najbardziej atrakcyjne dla nas samych, mając nadzieję, że nasz entuzjazm okaże się zaraźliwy.

Odkąd zaczęliśmy, wiele się zdarzyło w astronomii, nasza wiedza znacznie się poszerzyła, co znalazło także swoje odbicie w naszej książce. Poglądy Neila na status Plutona zostały zatwierdzone przez Międzynarodową Unię Astronomiczną, w historycznym głosowaniu w 2006 roku. Tysiące planet odkryto na orbitach innych gwiazd. Standardowy model kosmologiczny, włączając doń jądra atomowe, ciemną materię i ciemną energię, jest obecnie znany z wyjątkową dokładnością, dzięki obserwacjom i wynikom uzyskanym przez Hubble Space Telescope (Kosmiczny teleskop Hubble'a), program obserwacyjny Sloan Digital Sky Survey, satelitę Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) oraz satelitę Planck. Fizycy odkryli bozon Higgsa w akceleratorze Large Hadron Collider (Wielki Zderzacz Hadronów) w CERN-ie, robiąc kolejny krok w kierunku oczekiwanej teorii wszystkiego. W obserwatorium LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory — Laserowe Obserwatorium Interferometryczne Fal Grawitacyjnych)

dokonano bezpośredniej detekcji fal grawitacyjnych emitowanych przez zderzające się czarne dziury.

Opowiemy, w jaki sposób astronomowie zmierzyli, ile jest ciemnej materii, i skąd wiadomo, że to nie jest zwykła materia (zbudowana z jąder atomowych, zawierających protony i neutrony). Wyjaśnimy, skąd znamy gęstość ciemnej energii i skąd wiemy, że ma ujemne ciśnienie. Opowiemy o aktualnych hipotezach na temat pochodzenia Wszechświata i jego przyszłej ewolucji. Te pytania sięgają granic naszej obecnej wiedzy. Zamieściliśmy spektakularne zdjęcia z Kosmicznego Teleskopu Hubble'a, satelity WMAP oraz sondy New Horizons — ukazujące Plutona i jego księżyc, Charona.

Wszechświat jest niesamowity. Już w pierwszym rozdziale Neil ukazuje ogrom Wszechświata, przy którym czujemy się podekscytowani i zarazem dostrzegamy, jak mała i nic nie znacząca jest nasza planeta i my sami wraz z nią. Lecz naszym celem jest zrozumienie Wszechświata i poczucie mocy, które z niego wynika. Rozumiemy, jak działa grawitacja, jak ewoluują gwiazdy, znamy wiek naszego Wszechświata. Te i inne osiągnięcia ludzkiego umysłu, myśli i obserwacji powinny być powodem do dumy z przynależności do rodzaju ludzkiego.

Wszechświat wzywa. Zaczynamy.

J. Richard Gott
Princeton, New Jersey

---

1 Stephen Hawking zmarł 14 marca 2018 roku. (Przypisy oznaczone asteryskiem pochodzą od konsultantów i od tłumacza).

Część I – Gwiazdy, planety i życie

1 – Rozmiary i skale Wszechświata

Neil deGrasse Tyson

Zaczniemy od gwiazd, następnie wkroczymy do Galaktyki, do Wszechświata i dalej. Co powiedział Buzz Astral w Toy Story? „Na koniec świata i jeszcze dalej".

Wszechświat jest duży. Zaczniemy od rozmiarów i skali kosmosu, który jest większy, niż się spodziewasz. Jest gorętszy, niż się spodziewasz. Jest rzadszy, niż się spodziewasz. Wszystko, co myślisz na temat Wszechświata, jest mniej egzotyczne niż rzeczywistość Wszechświata. Zanim zaczniemy, będziemy potrzebować trochę narzędzi, więc wybierzmy się na wycieczkę do krainy liczb, dużych i małych, aby rozbudować i poszerzyć twój słownik oraz wyrobić wyczucie rozmiarów obiektów, które napotkamy we Wszechświecie. Zacznijmy od liczby 1. Wszyscy ją dobrze znamy. W zwykłej notacji nie zawiera zer, ale jeżeli zapiszemy ją w postaci wykładniczej, to będzie dziesięć do potęgi zero, 10^0. Liczba dziesięć może oczywiście być zapisana jako 10 do pierwszej potęgi, 10^1. Weźmy teraz tysiąc — 10^3. Jaki przedrostek oznacza tysiąc? „Kilo-": kilogram — tysiąc gramów; kilometr — tysiąc metrów. Przeskoczmy o kolejne trzy zera, do miliona, 10^6, dla którego przedrostkiem jest „mega-". Czy była to największa liczba znana wynalazcom megafonu? Gdyby słyszeli o miliardzie, który powstaje przez dodanie kolejnych trzech zer, co daje 10^9, czy nazwaliby swój wynalazek „gigafon"? Jeżeli znasz się na rozmiarach plików na dysku swojego komputera, to znasz takie pojęcia jak „megabajt" i „gigabajt". Gigabajt to miliard bajtów[1]. Nie jestem pewien, czy wiesz jak duży jest miliard, więc rozejrzyjmy się wokół i poszukajmy czegoś, co się liczy w miliardach.

Po pierwsze, na świecie jest 7 miliardów ludzi.

Bill Gates? Ile jest wart? Gdy ostatnio sprawdzałem, był wart około 80 miliardów dolarów. Bill Gates jest patronem geeków; po raz pierwszy w historii ludzkości światem rządzą geeki. Nigdy wcześniej tak nie było. Czasy się zmieniają. Gdzie ostatnio widziałeś 100 miliardów? No cóż, niezupełnie 100 miliardów. McDonald's ogłosił: „Over 99 billion served"[2]. To największa liczba, jaką zapewne można zobaczyć na ulicy. Pamiętam, gdy zaczęli liczyć. Byłem jeszcze dzieckiem, gdy McDonald's obwieścił z dumą: „Over 99 billion served". Nigdy nie wyświetlili 100 miliardów. Zarezerwowali tylko dwie liczbowe pozycje w liczniku burgerów, więc musieli się zatrzymać na 99 miliardach. A potem sięgnęli po frazę z Carla Sagana i teraz piszą: „billions and billions served".

Weźmy 100 miliardów hamburgerów i ułóżmy je jeden za drugim. Zacznijmy od Nowego Jorku i idźmy na zachód. Czy dotrzemy do Chicago?

Oczywiście. Czy dotrzemy do Kalifornii? Tak, oczywiście. Znajdźmy jakiś sposób, aby unosiły się na wodzie. W naszych obliczeniach zakładamy, że średnica (4 cale) dotyczy bułki, a nie samego hamburgera, który jest nieco mniejszy od bułki. Ułóżmy je teraz na wodzie, na powierzchni oceanu, wzdłuż koła wielkiego Ziemi. Przecinamy Pacyfik, Australię, Afrykę, a następnie Atlantyk i ostatecznie docieramy do Nowego Jorku, ułożywszy po drodze łańcuch hamburgerów. Ułożyliśmy wokół Ziemi całkiem sporo hamburgerów, ale jeszcze trochę nam ich zostało. Co możemy zrobić z tymi, które zostały? Wyruszamy ponownie w podróż dookoła Ziemi, układając hamburgery w drugi łańcuch. A potem trzeci. I znowu. Okrążamy Ziemię 216 razy! I nadal mamy spory zapas hamburgerów. Znudzeni 216 wycieczkami dookoła Ziemi zmieniamy kierunek i zaczynamy układać hamburgery jeden na drugim. Jak wysoko dojdziemy? Układając grube na 2 cale hamburgery jeden na drugim, dotrzemy do Księżyca i wciąż zostanie ich jeszcze sporo. Dopiero po 216 okrążeniach Ziemi, po wycieczce na Księżyc i po powrocie na Ziemię zużyjemy nasze 100 miliardów hamburgerów. To dlatego krowy tak się boją McDonald'sa. Dla porównania, Droga Mleczna liczy około 300 miliardów gwiazd, więc McDonald's ewidentnie wybiera się w kosmos.

Gdy masz 31 lat, 7 miesięcy, 9 godzin, 4 minuty i 20 sekund, mija miliardowa sekunda twojego życia. Gdy osiągnąłem ten wiek, uczciłem to butelką szampana. To była niewielka butelka. Nieczęsto zdarza nam się natrafić na miliard.

Idźmy dalej. Kto jest następny? Bilion: 10^{12}. Dla biliona mamy przedrostek „tera-". Nie dasz rady policzyć do biliona. Możesz oczywiście spróbować, ale jeżeli co sekundę wypowiesz kolejną liczbę, bilion zajmie ci tysiąc razy 31 lat, czyli 31 tysięcy lat. Dlatego raczej nie polecam tego ćwiczenia, nawet w domu. Bilion sekund temu mieszkający w jaskiniach troglodyci malowali na ścianach swoich salonów rysunki, które obecnie badają archeolodzy.

W Rose Center of Earth and Space (Centrum Ziemi i Kosmosu w Muzeum Historii Naturalnej w Nowym Jorku) ułożona jest czasowa spirala Wszechświata, która zaczyna się od Wielkiego Wybuchu i rozwija się przez 13,8 miliarda lat. Gdyby ją rozwinąć, byłaby tak długa jak boisko piłkarskie. Każdy krok wzdłuż niej oznacza 50 milionów lat. Gdy dojdziesz do końca, możesz zapytać, gdzie my jesteśmy? Gdzie jest historia ludzkiego gatunku? Cały ten bilion sekund, od zamieszkujących jaskinie artystów po dzień dzisiejszy, zajmuje na spirali tyle miejsca, ile wynosi grubość ludzkiego włosa, który zresztą umieściliśmy na końcu spirali. Może nam się wydawać, że ludzkie życie jest długie, że cywilizacje trwają niezmiernie długo, ale nie w skali kosmosu.

Co dalej? 10^{15}. Biliard, wraz z przedrostkiem „peta-". To jedna z moich ulubionych liczb. Zdaniem eksperta, Edwarda O. Wilsona, na Ziemi (i w niej) żyje od 1 do 10 biliardów mrówek.

Co dalej? 10^{18}. Trylion, wraz z przedrostkiem „exa-". Mniej więcej tyle jest ziaren piasku na dziesięciu dużych plażach. Najsłynniejsza plaża na Ziemi, Copacabana w Rio de Janeiro, jest długa na 4,2 kilometra i była szeroka na 55

metrów, zanim ją poszerzono do 140 metrów, przywożąc i dosypując dodatkowe 3,5 miliona metrów sześciennych piasku. Przeciętna średnica ziaren piasku na poziomie morza na plaży Copacabana wynosi 1/3 milimetra, co daje 27 ziaren w milimetrze sześciennym. 3,5 miliona metrów sześciennych takiego piasku daje około 10^{17} ziaren, co obecnie stanowi większość piasku na plaży Copacabana, więc dziesięć plaż podobnych do Copacabany zawiera około 10^{18} ziaren.

Ponownie powiększmy naszą liczbę tysiąc razy i otrzymamy 10^{21}, czyli tryliard. Przeszliśmy od kilometrów, megafonów, przez hamburgery w McDonald's, artystów Cro-Magnon, po mrówki i ziarna piasku na plaży, aż w końcu doszliśmy do tryliardów: 10 tryliardów gwiazd znajduje się w obserwowalnym Wszechświecie.

Ludzie, którzy uważają, że jesteśmy sami w tym kosmosie, nie mają pojęcia o rozmiarach Wszechświata i o liczbach, które są niezbędne, aby te rozmiary wyrazić. Później zajmiemy się tym, co rozumiemy przez pojęcie obserwowalny Wszechświat, czyli tę jego część, którą możemy zobaczyć.

Skoro jesteśmy przy liczbach, przeskoczmy jeszcze dalej. Weźmy liczbę znacznie większą od tryliarda, na przykład 10^{81}. O ile mi wiadomo, ta liczba nie ma nazwy. Jest to liczba atomów w obserwowalnym Wszechświecie. Czy zatem potrzebujemy jeszcze większych liczb? Co takiego mogłyby one reprezentować? Na przykład 10^{100}, ładna i okrągła liczba. Nazywa się googol. Nie należy jej mylić z Google, czyli firmą, która świadomie przekręciła słowo „googol".

Nie istnieją obiekty w obserwowalnym Wszechświecie, których zliczanie dałoby googol. To po prostu fajna liczba. Możemy ją zapisać jako 10^{100} albo jako 10^100. Nie możemy jej użyć do liczenia rzeczy, ale możemy w innych sytuacjach — nie liczymy rzeczy, lecz liczymy, na ile sposobów jakaś rzecz może się zdarzyć. Na przykład, na ile sposobów można rozegrać partię szachów. Partia szachów może zostać uznana za remis (pat) przez jednego z graczy: po trzykrotnym powtórzeniu tego samego ustawienia; gdy każdy gracz wykonał serię pięćdziesięciu posunięć bez ruchu pionkiem i bez zbicia figury przeciwnika; lub gdy na szachownicy nie ma dostatecznej liczby figur, aby dało się zrealizować szach-mat. Jeżeli założymy, że partia obowiązkowo kończy się remisem, gdy którykolwiek z powyższych warunków zostanie spełniony, to można policzyć liczbę możliwych partii szachów. Rich Gott to policzył i wyszła mu liczba nieco mniejsza niż 10^(10^4,4). To o wiele więcej niż googol, który wynosi zaledwie 10^(10^2). Jeżeli nie liczymy rzeczy, lecz liczymy, na ile sposobów coś może się zdarzyć, mogą się pojawić naprawdę duże liczby.

Mam w zanadrzu jeszcze większą liczbę. Jeżeli googol to jedynka, po której następuje sto zer, to co powiesz na liczbę 10 podniesioną do potęgi googol? Taka liczba ma nazwę googolplex. To jest jedynka, po której następuje googol zer. Czy da się ją zapisać? Niestety, nie. Potrzeba googol zer, a googol jest większy niż liczba atomów we Wszechświecie, więc musimy się zadowolić zapisem wykładniczym: 10^{googol}, $10^{10^{100}}$ albo 10^(10^100). Jeżeli jesteś silnie

zmotywowany, mógłbyś spróbować zapisać 10^{19} zer na wszystkich atomach we Wszechświecie, ale z pewnością masz lepsze rzeczy do zrobienia.

Nie robię tego po to, aby marnować twój czas. Mam w zanadrzu liczbę, która jest jeszcze większa niż googolplex. Jacob Bekenstein wyprowadził wzór, który pozwala oszacować maksymalną liczbę różnych stanów kwantowych, które mają masę i rozmiary porównywalne z naszym obserwowalnym Wszechświatem. Uwzględniając kwantowe rozmycie, byłaby to maksymalna liczba różnych obserwowalnych wszechświatów podobnych do naszego. Jest to 10^(10^124), liczba, która ma 10^{24} razy więcej zer niż googolplex. Wśród tych 10^(10^124) wszechświatów są takie, w których występują same czarne dziury, a także takie, które wyglądają dokładnie jak nasz, lecz w twoich nozdrzach brakuje jednej cząsteczki tlenu, a w nozdrzach mieszkańca jakiejś odległej planety jest jedna cząsteczka więcej.

Tak więc istnieją pożytki i zastosowania dla bardzo dużych liczb. Ja sam nie wiem, do czego mogłyby się przydać liczby jeszcze większe niż 10^(10^124), ale matematycy z pewnością to wiedzą.

Pewne twierdzenie zawiera liczbę 10^(10^(10^34)), zwaną liczbą Skewe'a. Matematycy lubią wybiegać myślami daleko poza fizyczne ograniczenia.

Zajmijmy się teraz innymi ekstremami we Wszechświecie.

Czym jest gęstość? Wszyscy intuicyjnie wiemy, co to jest gęstość, więc teraz przyjrzyjmy się różnym gęstościom w kosmosie. Na początek weźmy powietrze wokół nas. Wdychamy $2{,}5 \times 10^{19}$ molekuł na centymetr sześcienny — w tym 78% stanowi azot, a 21% tlen.

Gęstość $2{,}5 \times 10^{19}$ molekuł na centymetr sześcienny to zapewne więcej, niż się spodziewałeś. A teraz zobaczmy, jaka gęstość występuje w laboratoryjnej próżni. Potrafimy dzisiaj uzyskać laboratoryjną próżnię o gęstości około stu molekuł na centymetr sześcienny. A jak jest w przestrzeni międzyplanetarnej? Gęstość wiatru słonecznego w sąsiedztwie Ziemi wynosi około dziesięciu protonów na centymetr sześcienny. Gdy mówimy o gęstości w tym kontekście, mamy na myśli liczbę molekuł, atomów lub innych cząstek, z których składa się gaz (wiatr słoneczny składa się głównie z protonów). A jak jest w przestrzeni międzygwiezdnej? Jej gęstość zależy od konkretnego miejsca, ale istnieją obszary, gdzie gęstość spada do jednego atomu na centymetr sześcienny. W przestrzeni międzygalaktycznej gęstość jest jeszcze mniejsza: jeden atom na metr sześcienny.

Nawet w najlepszych laboratoriach nie potrafimy uzyskać takiej gęstości. Istnieje stare powiedzenie „natura nie znosi próżni". Jego autor zapewne nigdy nie opuścił powierzchni Ziemi, ponieważ w rzeczywistości natura wręcz kocha próżnię. Większość Wszechświata składa się z próżni. Słowo „natura" w powyższym stwierdzeniu odnosi się do tego szczególnego miejsca, w którym obecnie się znajdujemy, u podstawy warstwy powietrza zwanej atmosferą. Ziemskie powietrze rzeczywiście wypełnia każdą pustą przestrzeń, do której ma dostęp.

Załóżmy, że rozgniotę kawałek kredy do tablicy i podniosę mały kawałek. Niech to będzie okruszek o średnicy około milimetra. Wyobraźmy sobie teraz, że to jest proton. Czy wiesz, jaki jest najprostszy atom? Atom wodoru. Jądro

wodoru stanowi jeden proton, a wokół jądra krąży jeden elektron. Gdyby proton miał rozmiary naszego okruszka kredy, to jak duży byłby atom wodoru? Czy byłby podobny do piłki plażowej? Byłby znacznie większy. Miałby średnicę 100 metrów, mniej więcej tyle, ile wynosi wysokość trzydziestopiętrowego wieżowca. Co to wszystko oznacza? Atomy są całkiem puste. Nie ma żadnych innych cząstek między protonem i tym samotnym elektronem krążącym wokół protonu po orbicie, która, jak wiemy z mechaniki kwantowej, ma kształt sfery wokół protonu. Przejdźmy teraz do jeszcze mniejszych rozmiarów, aż dojdziemy do kolejnej kosmicznej granicy, reprezentowanej przez obiekty tak małe, że nawet nie potrafimy ich zmierzyć. Nie wiemy, jakie są rozmiary elektronu, ponieważ jest mniejszy niż cokolwiek, co umiemy zmierzyć. Teoria superstrun sugeruje, że elektron jest maleńką, drgającą struną o długości $1{,}6 \times 10^{-35}$ metra.

Atomy mają rozmiary około 10^{-10} (jeden do dziesięciu miliardów) metra. Jeszcze mniejsze rozmiary (10^{-12}-10^{-13}) ma jon uranu z jednym elektronem na orbicie, a także egzotyczna forma wodoru, w której elektron został zastąpiony przez swojego cięższego kuzyna, zwanego mionem. Taki wodór jest około dwustu razy mniejszy od normalnego atomu wodoru, jego czas życia wynosi zaledwie około 2,2 mikrosekundy, ponieważ mion ulega spontanicznemu rozpadowi. Dopiero gdy zejdziemy do rozmiarów rzędu 10^{-14}-10^{-15} metra, będziemy mieli do czynienia z rozmiarami jąder atomowych.

A teraz przejdźmy do większej gęstości. Jak gęste jest Słońce? Bardzo gęste w środku, lecz znacznie mniej gęste w pobliżu powierzchni. Średnia gęstość Słońca wynosi około 1,4 gęstości wody. A gęstość wody znamy: 1 gram na centymetr sześcienny. W samym środku gęstość Słońca wynosi 160 gramów na centymetr sześcienny. Pod względem gęstości nasze Słońce jest dość zwyczajną gwiazdą, lecz istnieją gwiazdy, które potrafią się zachowywać zdumiewająco — niektóre rozszerzają się i osiągają bardzo niską gęstość, inne zapadają się i stają się bardzo małe oraz bardzo gęste. Przypomnijmy sobie nasz okruszek kredy, reprezentujący proton, oraz otaczającą proton pustą przestrzeń, w której krąży samotny elektron. Istnieją we Wszechświecie procesy, które zgniatają materię gwiazdy tak mocno, że osiąga ona gęstość jądra atomowego. Każde jądro w takiej gwieździe styka się policzkiem z policzkami sąsiednich jąder. Obiekty o tak wyjątkowych cechach — względnie małe i supergęste — są zbudowane głównie z neutronów.

Astronomowie mają skłonność do nazywania rzeczy takimi, jakie są. Duże czerwone gwiazdy są nazywane czerwonymi olbrzymami. Małe białe gwiazdy to białe karły. Gdy gwiazda jest zbudowana z neutronów, nazywamy ją gwiazdą neutronową. Gwiazdy, które pulsują, nazywają się pulsarami. Biolodzy wymyślają długie łacińskie nazwy. Lekarz zapisuje receptę hieroglifami, których pacjent wprawdzie nie rozumie, lecz wręcza receptę farmaceucie. Farmaceuta potrafi odcyfrować receptę, a następnie instruuje nas, kiedy i jak mamy połykać związek chemiczny o długiej, równie niezrozumiałej nazwie. Nazwa najbardziej popularnej molekuły w biochemii składa się z jedenastu sylab: kwas deoksyrybonukleinowy! Ale początek całej przestrzeni, czasu, materii i energii w kosmosie potrafimy opisać dwoma

prostymi słowami: Wielki Wybuch. Zajmujemy się nauką, w której królują monosylaby, ponieważ Wszechświat jest dostatecznie złożony i trudny do zrozumienia. Nie ma powodów, aby jeszcze dodatkowo sobie utrudniać życie przez stosowanie wielkich słów.

Chcesz więcej? Istnieją miejsca we Wszechświecie, gdzie grawitacja jest tak silna, że światło nie może się z nich wydostać. Jeżeli tam wpadniesz, to też się nie wydostaniesz. To czarne dziury. Proste, dwusylabowe słowa. Przepraszam, ale musiałem to zrzucić z siebie.

Jak gęsta jest gwiazda neutronowa? Weźmy naparstek materii gwiazdy neutronowej. Niegdyś ludzie szyli ubrania ręcznie, za pomocą igły. Naparstek chronił palce przez ukłuciem igłą. Aby uzyskać gęstość gwiazdy neutronowej, należy stado 100 milionów słoni zmieścić w tym naparstku. Innymi słowy, jeżeli umieścisz 100 milionów słoni na jednej szalce wagi, a naparstek materii gwiazdy neutronowej na drugiej szalce, to się zrównoważą. Całkiem gęsta ta gwiazda. Grawitacja gwiazdy neutronowej jest również bardzo silna. Jak bardzo? Zejdźmy na jej powierzchnię i sprawdźmy.

Jedna z metod pomiaru grawitacji polega na sprawdzeniu, ile energii potrzeba, aby coś podnieść. Jeżeli grawitacja jest silna, potrzeba więcej energii. Wchodząc schodami na pierwsze piętro, zużywam pewną ilość energii, która mieści się w granicach moich energetycznych rezerw. Wyobraźmy sobie jednak wysoki na 20 tysięcy kilometrów klif na hipotetycznej planecie, gdzie grawitacja jest podobna do ziemskiej. Ile energii zużyjesz, wspinając się wzdłuż pionowej ściany klifu od podnóża do szczytu? Będziesz musiał skonsumować pokaźną liczbę energetyzujących batoników lub jakichś innych wysokokalorycznych, łatwo przyswajalnych produktów. Wspinając się w dość szybkim tempie 100 metrów na godzinę, przez 24 godziny na dobę, spędzisz na tym klifie ponad 22 lata. Tyle samo energii będziesz potrzebował, aby na powierzchni gwiazdy neutronowej wspiąć się tak wysoko, ile wynosi grubość kartki papieru. Gwiazdy neutronowe prawdopodobnie nie są siedliskiem życia.

Przeszliśmy od jednego protonu na metr sześcienny do 100 milionów słoni w jednym naparstku. O czym jeszcze nie mówiliśmy? O temperaturze. Zacznijmy od gorących okolic. Na powierzchni Słońca temperatura wynosi około 6 tysięcy kelwinów (6000 K). W takiej temperaturze wszystko zamienia się w gaz, dlatego Słońce jest wielką kulą gazu (dla porównania, średnia temperatura na powierzchni Ziemi wynosi zaledwie 287 K).

A jaka temperatura panuje we wnętrzu Słońca? Jak łatwo się domyślić, w środku jest cieplej niż na powierzchni — istnieją na to przekonujące dowody, jak zobaczymy w dalszej części tej książki. W centrum Słońca jest około 15 milionów kelwinów. W takiej temperaturze dzieją się zdumiewające rzeczy. Protony poruszają się bardzo szybko. W normalnych warunkach dwa protony się odpychają, ponieważ mają taki sam (dodatni) ładunek. Jeżeli jednak poruszają się dostatecznie szybko, mogą przezwyciężyć odpychającą siłę i zbliżyć się do siebie na tak małą odległość, że włączy się całkiem inna siła — oprócz elektrostatycznej siły odpychającej pojawi się także siła przyciągająca, która działa na bardzo małych odległościach. Jeżeli dwa protony znajdą się w

zasięgu tej siły, to się połączą. Ta siła ma swoją nazwę — oddziaływanie silne. Tak, to jest oficjalna nazwa siły jądrowej, która jest odpowiedzialna za wiązanie protonów i powstawanie nowych pierwiastków, na przykład za przekształcanie wodoru w hel. Głęboko w swoich wnętrzach gwiazdy produkują pierwiastki cięższe od tych, z którymi się narodziły. Więcej na ten temat opowiemy w rozdziale 7.

No to teraz się ochłodzimy. Jaka jest temperatura całego Wszechświata? Wszechświat rzeczywiście ma temperaturę jako pozostałość po Wielkim Wybuchu. 13,8 miliarda lat temu cała przestrzeń, czas, energia i materia, jaką obecnie widzimy, była skupiona w jednym miejscu. Rodzący się Wszechświat był gorącym kotłem materii i energii. Kosmiczna ekspansja schłodziła Wszechświat do około 2,7 K.

Wszechświat nadal się rozszerza. Jakkolwiek niepokojąco to zabrzmi, podróżujemy bez biletu powrotnego. Narodziliśmy się w Wielkim Wybuchu i będziemy się zawsze rozszerzać. Temperatura będzie się obniżać, osiągając 2 K, następnie 1 K, następnie 1/2K, asymptotycznie dążąc do absolutnego zera. Ostatecznie, ze względu na efekt odkryty przez Stephena Hawkinga (Rich opowie o tym w rozdziale 24) temperatura może osiągnąć około 7×10^{-31}, lecz to żadna pociecha. Gwiazdy wypalą całe swoje termojądrowe paliwo i stopniowo wymrą, znikając po kolei z nieba. Nowe gwiazdy wciąż powstają z międzygwiezdnych obłoków, więc zapasy gazu w obłokach nieustannie się zmniejszają. Gwiazdy powstają z gazu, żyją, ewoluują i zostawiają po sobie końcowe produkty gwiezdnej ewolucji: czarne dziury, gwiazdy neutronowe, białe karły. To potrwa tak długo, aż wszystkie światła w Galaktyce zgasną, jedno po drugim. Galaktyka gaśnie. Wszechświat gaśnie. Zostaną tylko czarne dziury, emitujące słabiutkie promieniowanie — również odkryte przez Stephena Hawkinga.

I kosmos się skończy, ale nie wybuchem, lecz piskiem.

Na długo przed tym, zanim wymrze cały kosmos, taki sam los spotka nasze Słońce. Początkowo spuchnie, i to tak, że nikt nie chciałby być w pobliżu. Gdy Słońce umiera, skomplikowane procesy termiczne w jego wnętrzu powodują, że zewnętrzna powłoka się rozszerza. Słońce staje się większe, coraz większe, stopniowo zajmując coraz większy obszar w polu widzenia, a rozszerzając się, pochłonie Merkurego, a następnie także Wenus. Za 5 miliardów lat Ziemia będzie nadpalonym węgielkiem krążącym tuż nad powierzchnią Słońca. Oceany wyparują dużo wcześniej, atmosfera zostanie rozgrzana do takiej temperatury, że wszystkie atmosferyczne cząstki uciekną w przestrzeń. Życie w takiej formie, w jakiej je znamy, przestanie istnieć. Za mniej więcej 7,6 miliarda lat Ziemia wpadnie w atmosferę Słońca i wyparuje.

Miłego dnia!

W tym rozdziale starałem się przedstawić potęgę i rozmiary zjawisk, o których jest ta książka. W kolejnych rozdziałach wszystko to zostanie przedstawione bardziej dogłębnie i szczegółowo. Witaj we Wszechświecie.

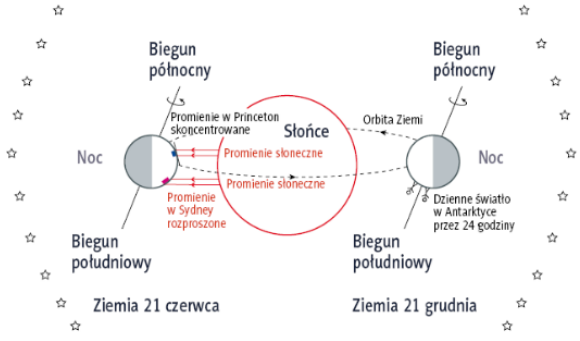
2 – Od dziennego i nocnego nieba do planetarnych orbit

Neil deGrasse Tyson

Niniejszy rozdział obejmuje 3 tysiące lat astronomii. Począwszy od starożytności, Babilonii, aż po XVII wiek. Nie będzie to jednak lekcja historii. Nie będę szczegółowo omawiał, kto co odkrył i kto pierwszy coś wymyślił. Chcę tylko opisać, czego ludzkość nauczyła się przez cały ten czas, począwszy od zjawisk widocznych na nocnym niebie.

Oto Słońce (il. 2.1). Obok niego narysujmy Ziemię; ilustracja nie jest w skali, ani w sensie rozmiarów, ani odległości, ma jedynie przedstawić pewne cechy układu Słońce–Ziemia. Gwiazdy są oczywiście znacznie dalej. Na razie zakładamy, że są tylko światłami na niebie, wewnątrz dużej sfery, co pozwoli uprościć opis innych rzeczy.

Ziemia, jak zapewne wiesz, obraca się wokół osi, a oś jest nachylona względem płaszczyzny orbity wokół Słońca. Kąt nachylenia wynosi 23,5°. Ile czasu zajmuje jeden obrót wokół osi? Jeden dzień. Ile czasu zajmuje jeden obrót wokół Słońca? Jeden rok. Trzydzieści procent Amerykanów udzieliło błędnej odpowiedzi na drugie pytanie.



ILUSTRACJA 2.1. Ziemia okrąża Słońce, więc w różnych porach roku widzimy inny obraz nocnego nieba. Ze względu na nachylenie osi Ziemi względem orbity, 21 czerwca więcej promieni słonecznych pada na półkulę północną niż na południową. 21 grudnia ludzie mieszkający na południe od antarktycznego koła polarnego widzą dzienne światło przez pełne 24 godziny, krążąc wraz z Ziemią wokół jej osi

Credit: J. Richard Gott

Wirujący w przestrzeni obiekt jest w istocie dość stabilny. Krążąc wzdłuż orbity wokół Słońca, Ziemia cały czas zachowuje swoją orientację w przestrzeni. Jeżeli przesuniemy Ziemię od położenia 21 czerwca do położenia 21 grudnia (na prawo na il. 2.1), jej oś będzie nadal utrzymywać ten sam kierunek w przestrzeni. Orientacja osi nie zmienia się w trakcie całej podróży wokół Słońca, co ma interesujące konsekwencje. Na przykład 21 czerwca pionowa linia, prostopadła do płaszczyzny ziemskiej orbity, dzieli Ziemię na dzień i noc. Co możemy powiedzieć na temat tej części Ziemi na lewo od owej

linii, dalej od Słońca? Tam jest noc. Lecz 21 grudnia, gdy Ziemia znajduje się na przeciwnym końcu orbity, noc jest po przeciwnej stronie — na prawo od linii na ilustracji. Mieszkańcy Ziemi, którzy spoglądają w nocy na niebo, widzą tylko tę część nieba, która znajduje się po przeciwnej stronie względem Słońca. 21 czerwca nocne niebo jest inne (gwiazdy po lewej stronie) niż nocne niebo 21 grudnia (gwiazdy po prawej stronie). W letnie noce widzimy na niebie „letnie" konstelacje, takie jak Krzyż Północy (Łabędź), Lira, natomiast w zimie widzimy „zimowe" konstelacje, takie jak Orion i Taurus (Byk).

Przeskoczmy teraz na półkulę południową. 21 grudnia na prawo od pionowej linii jest noc. Ktoś, kto stoi na Antarktydzie, na południe od antarktycznego koła podbiegunowego, wraz z całą Antarktydą krąży wokół bieguna południowego. A co widzi? Czy widzi nocne niebo? Nie. 21 grudnia dzień trwa tam 24 godziny — przez 24 godziny świeci Słońce — w trakcie pełnego obrotu Ziemi wokół osi. W tym dniu nie ma nocy dla nikogo, kto znajduje się wewnątrz antarktycznego koła podbiegunowego. Na takiej samej zasadzie, jeżeli wybierzemy się w okolice bieguna północnego, zobaczymy, że mieszkańcy arktycznego koła podbiegunowego — Święty Mikołaj i jego renifery — krążą wokół bieguna północnego i nigdy nie znajdą się w dziennej strefie Ziemi. 21 grudnia noc trwa u nich 24 godziny. Jak łatwo odgadnąć, 21 czerwca jest na odwrót: mieszkańcy Antarktyki nie mają wtedy dnia, a mieszkańcy Arktyki nie mają nocy.

A teraz spójrzmy na niebo z Princeton w stanie New Jersey — blisko Nowego Jorku, ale nie ma tu wieżowców ani innych miejskich źródeł mocnego światła, które mogłoby utrudnić nocne obserwacje. Szerokość geograficzna Princeton wynosi około 40°. O świcie 21 czerwca obracająca się półkula północna przenosi stan New Jersey w strefę dnia. Tego dnia światło słoneczne na półkuli północnej pada pod większym kątem względem powierzchni ziemi niż na półkuli południowej.

Gdy Słońce osiąga najwyższy punkt na niebie, mówimy, że jest południe. Czy wiesz, że w kontynentalnej części Stanów Zjednoczonych Słońce nigdy nie znajduje się wprost nad naszymi głowami? W dowolnej porze dnia, w dowolnej porze roku nigdy nie zaświeci nam pionowo z góry. Ale gdy zagadniesz kogoś na ulicy i zapytasz „gdzie jest Słońce w południe?", większość ludzi odpowie „wprost nad głową". Czy to nie jest dziwne? W tym i w podobnych przypadkach ludzie po prostu powtarzają coś, co wydaje im się prawdziwe, zdradzając tym samym, że nigdy nie spojrzeli w górę i nie sprawdzili. Nigdy nie przekonali się na własne oczy. Nigdy nie przeprowadzili eksperymentu. Świat jest pełen takich rzeczy. Na przykład, co mówimy zazwyczaj na temat długości dnia w zimie? „W zimie dzień jest coraz krótszy, w lecie jest coraz dłuższy". Pomyślmy. Który dzień w roku jest najkrótszy? To 21 grudnia, dzień przesilenia zimowego i zarazem pierwszy dzień zimy na półkuli północnej. Skoro pierwszy dzień zimy jest najkrótszym dniem roku, to co z pozostałymi dniami zimy? Muszą być coraz dłuższe. W zimie dni są coraz dłuższe, a nie coraz krótsze. Nie potrzeba doktoratu ani grantu od Narodowego Centrum Nauki, aby to odkryć. Pora dzienna wydłuża się w zimie, a skraca się w lecie.

Która gwiazda nocnego nieba jest najjaśniejsza? Mówi się, że Gwiazda Północna. Czy kiedykolwiek popatrzyłeś w górę, aby to sprawdzić? Większość ludzi nie sprawdziła i nie wie. Gwiazda Północna (znana także jako Polaris) nie jest w pierwszej dziesiątce. Nie jest także w pierwszej dwudziestce. Nie jest w pierwszej trzydziestce. Nie jest nawet w pierwszej czterdziestce. Gwiazda Północna jest dopiero czterdziesta piąta pod względem jasności na nocnym niebie. zrób mi więc tę przysługę, zaczepiaj ludzi na ulicy, zadaj im to pytanie, a następnie oświeć ich. Jeśli sam nie wiesz, najjaśniejszą gwiazdą jest Syriusz, czyli Psia Gwiazda.

Australia jest zbyt daleko na południu, aby ktoś stamtąd mógł dojrzeć Gwiazdę Północną. Nie mają tam także Gwiazdy Południowej. A skoro już porównujemy półkule, nie mamy powodu, aby zazdrościć półkuli południowej. Weźmy pod uwagę Krzyż Południa. Na pewno o nim słyszałeś. Ludzie piszą o nim piosenki. Ale czy wiesz, że jest to najmniejsza ze wszystkich osiemdziesięciu ośmiu konstelacji? Zaciśnięta pięść wyciągnięta na długość ręki zasłania całkowicie całą konstelację. Poza tym cztery najjaśniejsze gwiazdy Krzyża Południa tworzą rodzaj koślawego pudełka. Nie ma gwiazdy, która stanowiłaby środek krzyża. Bardziej adekwatne byłoby określenie „Romb Południa". Dla porównania, Krzyż Północy (Łabędź) obejmuje około dziesięciu razy większy obszar nieba i ma sześć wyraźnie widocznych gwiazd — wygląda jak krzyż, z jedną gwiazdą w środku. Na półkuli północnej mamy sporo wielkich konstelacji.

Porównajmy teraz promienie słoneczne w dwóch różnych miejscach na Ziemi. W południe 21 czerwca w Princeton promienie słoneczne padają na powierzchnię Ziemi pod bardzo dużym kątem. Na ilustracji 2.1 dwa równoległe promienie padają w Princeton na dwa punkty położone w niewielkiej odległości od siebie. Takie same dwa promienie w Sydney, w Australii, padają na powierzchnię Ziemi pod mniejszym kątem i trafiają na dwa punkty nieco bardziej oddalone od siebie. Co tu się dzieje? W którym mieście powierzchnia ziemi jest skuteczniej ogrzewana przez promieniowanie Słońca? Oczywiście w Princeton. Ze względu na kąt padania energia promieniowania słonecznego jest bardziej skoncentrowana, dzięki czemu powierzchnia ziemi w Princeton jest gorętsza. 21 czerwca w Princeton jest lato, a w Sydney zima. Sześć miesięcy później, 21 grudnia, będzie odwrotnie.

Słońce ogrzewa ziemię, ziemia ogrzewa powietrze. Słońce nie nagrzewa powietrza bezpośrednio, ponieważ powietrze jest przezroczyste dla większości promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi. Energia promieniowania słonecznego osiąga maksimum w widzialnej części widma. Słońce jest dobrze widoczne przez warstwę atmosfery, z czego wynika dość oczywisty fakt, że atmosfera nie absorbuje widzialnego promieniowania Słońca. W przeciwnym razie w ogóle nie widzielibyśmy Słońca. Jeżeli siedzisz w zamkniętym pomieszczeniu bez okien, nie widzisz Słońca, ponieważ dach budynku absorbuje widzialne światło Słońca. Aby je zobaczyć, musisz spojrzeć przez przezroczyste okno lub wyjść na zewnątrz. Podsumowując, sekwencja jest następująca. Światło słoneczne przenika przez przezroczystą atmosferę i

trafia w ziemię. Ziemia absorbuje światło słoneczne, a następnie oddaje tę energię w postaci niewidocznego promieniowania podczerwonego, które z kolei może być i jest absorbowane przez atmosferę. Więcej o widmie promieniowania powiemy w rozdziale 4.

Grunt absorbuje widzialne światło słoneczne, nagrzewa się, a następnie emituje część energii w postaci promieniowania podczerwonego i nagrzewa powietrze. To nie następuje natychmiast. Cały ten proces trochę trwa. Jak długo? Kiedy jest najgorętsza pora dnia? Bynajmniej nie w południe. Wtedy jest maksimum nagrzewania ziemi. Najgorętsza pora dnia nigdy nie jest w południe, lecz kilka godzin później: o drugiej, o trzeciej, w niektórych miejscach nawet o czwartej po południu.

Gdy biegun północny na ziemskiej osi przechyla się w kierunku Słońca, na półkuli północnej jest lato, a na południowej zima. Najgorętsza pora dnia następuje po godzinie 12 w południe i z tego samego powodu najgorętszy dzień na półkuli północnej następuje po 21 czerwca. Letni sezon zaczyna się 21 czerwca, a później jest jeszcze cieplej. Na tej samej zasadzie 21 grudnia jest początek zimy na półkuli północnej, a później jest zimniej.

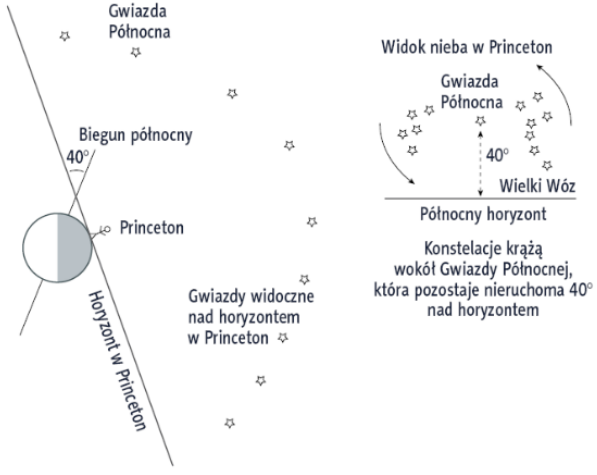
Trzy miesiące później, 21 marca, zaczyna się wiosna. W pierwszym dniu wiosny (21 marca) i w pierwszym dniu jesieni (21 września) w trakcie dobowego obrotu Ziemi każdy zakątek planety trafia zarówno do strefy dziennej, jak i do nocnej. W te dwa dni (dni równonocy) w każdym miejscu Ziemi dzień i noc trwa tyle samo — połowę doby.

Północny koniec osi Ziemi celuje w kierunku Gwiazdy Północnej, Polaris. Kosmiczna koincydencja? Niezupełnie, ponieważ w rzeczywistości oś Ziemi nie trafia dokładnie w Gwiazdę Północną. Można zmieścić 1,3 szerokości Księżyca między Gwiazdą Północną a dokładnym punktem (północnym biegunem niebieskim), przez który przechodzi przedłużenie ziemskiej osi.

Powróćmy do Princeton. Patrząc w nocy na niebo, widzisz gwiazdy znajdujące się po jednej stronie nieba, jak widać na ilustracji 2.2. Te gwiazdy są oznaczone jako „gwiazdy widoczne nad horyzontem w Princeton". Sam horyzont jest narysowany jako linia styczna do powierzchni Ziemi w miejscu, w którym stoisz. W miarę dobowego obrotu Ziemi można zobaczyć, jak gwiazdy okrążają Gwiazdę Północną (po prawej stronie na il. 2.2). Sama Gwiazda Północna jest tak blisko północnego bieguna niebieskiego, że prawie się nie porusza. Wokół niej istnieje kołowa strefa, w której gwiazdy okrążają Gwiazdę Północną i nigdy nie chowają się za horyzontem. Są to tak zwane gwiazdy okołobiegunowe.

Popatrzmy teraz na jakąś gwiazdę położoną nieco dalej, poza strefą okołobiegunową. Ta gwiazda zachodzi, a następnie wschodzi i idzie w górę nieboskłonu. Tak wygląda niebo z powierzchni Ziemi. Jeden z dobrze widocznych asteryzmów (układów gwiazd tworzących pewien wzór), to Wielki Wóz, znany głównie dlatego, że składa się z jasnych gwiazd, jest położony w pobliżu Gwiazdy Północnej, krąży wokół niej, a jego tylne koła wskazują Gwiazdę Północną. W Princeton Wielki Wóz nigdy nie zachodzi. Ślizga się w pobliżu horyzontu, a następnie wznosi się do góry. Zachodzą

wszystkie gwiazdy, które są dalej od Gwiazdy Północnej niż Wielki Wóz. Pod jakim kątem Gwiazda Północna jest widoczna w Princeton? Możemy to zbadać. Załóżmy najpierw, że odwiedzamy Świętego Mikołaja na biegunie północnym. Gdzie jest Gwiazda Północna na niebie? Jeżeli jesteś na biegunie północnym, Gwiazda Północna jest niemal dokładnie nad głową. Zawsze jest dokładnie nad głową. Jakaś inna gwiazda, położona w połowie drogi między biegunem niebieskim a horyzontem, okrąża Gwiazdę Północną, zawsze pozostając na tej samej wysokości nad horyzontem. Kolejna gwiazda, położona tuż nad horyzontem, okrąża Gwiazdę Północną wzdłuż horyzontu. Żadna gwiazda nie wschodzi, żadna nie zachodzi; wszystkie okrążają Gwiazdę Północną i wszystkie są cały czas widoczne. Święty Mikołaj widzi całą północną sferę niebieską.



ILUSTRACJA 2.2. Widok nocnego nieba w Princeton (40° szerokości geograficznej północnej). Gwiazda Północna pozostaje na wysokości 40° nad horyzontem, a Wielki Wóz krąży wokół niej w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara

Credit: J. Richard Gott

Jaka jest szerokość geograficzna bieguna północnego? Dziewięćdziesiąt stopni. Jaka jest wysokość Gwiazdy Północnej nad horyzontem z punktu widzenia bieguna północnego? 90° — ta sama liczba. To nie przypadek. Gwiazda Północna jest na wysokości 90° i biegun północny jest na szerokości geograficznej 90°. Przenieśmy się na równik. Jaka jest szerokość geograficzna równika. Zero stopni. Gwiazda Północna jest teraz na horyzoncie — 0°. Jaka

jest szerokość geograficzna Princeton? Czterdzieści stopni. Zatem w Princeton Gwiazda Północna jest na wysokości 40° nad horyzontem.

Żeglarze, którzy nawigują według gwiazd, wiedzą, że wysokość Gwiazdy Północnej nad horyzontem jest równa szerokości geograficznej ich statku. Krzysztof Kolumb postawił żagle na ustalonej szerokości geograficznej, którą utrzymywał przez całą swoją podróż przez Atlantyk. Przyjrzyj się jego mapom. Nawigował w taki sposób, że cały czas utrzymywał Gwiazdę Północną na tej samej wysokości nad horyzontem, dzięki czemu jego statek wciąż znajdował się na tej samej szerokości geograficznej.

Czy bawiłeś się bąkiem, gdy byłeś dzieckiem? Widziałeś, jak się kołysze? Ziemia też się kołysze (w astronomii nazywa się to precesją). Nasza planeta jest wirującym bąkiem odczuwającym grawitacyjne oddziaływanie Słońca i Księżyca. Ziemia wiruje wokół swej osi, a oś ulega precesji. Jeden pełny okres precesji trwa 26 tysięcy lat. Obracamy się raz na dobę, a precesujemy raz na 26 tysięcy lat, co ma interesujące konsekwencje. Po pierwsze, rozważmy gwiezdną sferę, którą narysowałem wokół Układu Słonecznego. W miarę jak Ziemia porusza się wokół Słońca, Słońce przesuwa się w coraz to inne położenie na tle gwiazd. 21 czerwca Słońce znajduje się między nami a gwiazdami z prawej strony na ilustracji 2.1, co oznacza, że Słońce widziane z Ziemi przechodzi 21 czerwca na tle tych gwiazd. Natomiast 21 grudnia Słońce znajduje się między nami a gwiazdami z lewej strony na ilustracji 2.1. W innych porach roku Słońce przemieszcza się na tle jeszcze innych układów gwiazd, w miarę jak okrąża niebo. W dawnych czasach, gdy większość ludzi była niepiśmienna, gdy nie było telewizji, książek ani Internetu, nasza kultura rozwijała się na niebie. Niebiosa miały istotne znaczenie w życiu naszych przodków. Ludzki umysł jest bardzo wprawny w poszukiwaniu regularności, kształtów i wzorców, nawet tam, gdzie ich nie ma. Łatwo dostrzega regularności i wzorce w przypadkowym układzie kropek, mówiąc nam: „widzę tu układ". Spróbuj wykonać taki eksperyment: jeżeli umiesz programować komputer, weź około tysiąca kropek i umieść je na stronie w całkowicie losowy sposób. Przyjrzyj się im, a po chwili pomyślisz: „hej, widzę tu... Abrahama Lincolna!". Zobaczysz kształty. Na podobnej zasadzie antyczne ludy, nie wiedząc i nie rozumiejąc mechaniki nieba, dostrzegały na niebie rozmaite wzorce, tworząc w ten sposób swoją kulturę. Nie znając praw fizyki, nie rozumiejąc ruchów planet, mogli myśleć: „Hmm! Niebo jest większe ode mnie — z pewnością wywiera na mnie wpływ". Spoglądając na nocne niebo, mogli dojść do wniosku: „Tu widać układ gwiazd, który wygląda jak skorupiak; ma pewne cechy osobowości; Słońce było w tej części nieba, gdy się urodziłeś. To musi mieć jakiś związek z faktem, że jesteś takim dziwakiem. Tu widzimy jakieś ryby, a tam bliźnięta. Nie mamy HBO, więc stwórzmy swoje własne baśnie i przekazujmy je z pokolenia na pokolenie". W taki sposób antyczne cywilizacje stworzyły zodiak, zbiór konstelacji, na tle których Słońce przemieszcza się w ciągu roku.

Mamy dwanaście konstelacji; znasz je wszystkie — Waga, Skorpion, Baran i tak dalej. Znasz je, ponieważ pojawiają się niemal codziennie w mediach. Osoba, której nigdy nie spotkałeś, zarabia na swoje życie, opowiadając ci o

twoim życiu, o miłości i o przyszłości. Spróbujmy to zrozumieć. Po pierwsze, Słońce nie porusza się na tle dwunastu konstelacji. W rzeczywistości jest ich trzynaście. Nie mówią ci tego, ponieważ nie zarobiliby na tobie żadnych pieniędzy. Czy wiesz, jak nazywa się trzynasta konstelacja zodiaku? Wężownik. Łacińska nazwa, Ophiuchus, brzmi jak choroba zakaźna; ktoś mógłby zapytać: „Masz dziś Ophiuchusa?". Wiem, że wiesz, jaki jest twój znak, więc nie kłam i nie mów: „Nigdy nie czytam horoskopów". Większość Skorpionów to w rzeczywistości Ophiuchusy, lecz nie znajdziesz Ophiuchusa w tablicach astrologicznych.

Poświęćmy jeszcze minutę temu zagadnieniu. Kiedy ustanowiono znaki zodiaku? Dwa tysiące lat temu. Klaudiusz Ptolemeusz opublikował mapy zodiaku. Dwa tysiące lat to jest 1/13 z 26 tysięcy lat. Oś Ziemi precesuje, więc jeżeli 2 tysiące lat temu Słońce było widoczne na tle jakiejś konkretnej konstelacji (np. Skorpiona) w określonym miesiącu (np. w październiku), to po upływie owych 2 tysięcy lat uległo przesunięciu o 1/13 całego rocznego obrotu. A 1/13 to niewiele mniej niż 1/12, więc każdy znak zodiaku, któremu w gazetach są przypisane określone daty, jest przesunięty prawie o miesiąc. W rezultacie Skorpiony i Ophiuchusy to obecnie są Wagi.

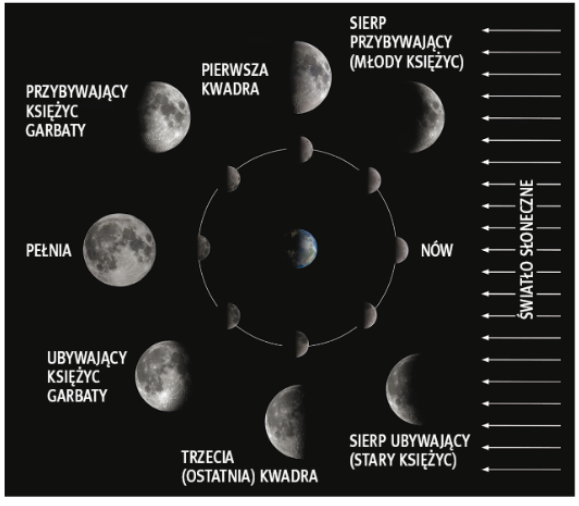
Na tym polega ogromna waga edukacji. Zdobywasz wiedzę o tym, jak działa Wszechświat. Jeżeli nie potrafisz ocenić, czy inni ludzie wiedzą, o czym mówią, twoje pieniądze niepotrzebnie płyną do ich kieszeni. Antropologowie i socjolodzy mówią, że loterie państwowe to jest forma podatku nakładana na ubogich. Niezupełnie. To jest podatek nakładany na ludzi, którzy nie przykładali się w szkole do matematyki. Gdyby się przyłożyli, to wiedzieliby, że rachunek prawdopodobieństwa działa przeciwko nim i nie wydaliby ani centa, ani grosza na kupony totolotka.

Celem tej książki jest edukacja. Plus pewna dawka kosmicznego oświecenia.

Porozmawiamy teraz o Księżycu, potem przejdziemy do Johannesa Keplera, a następnie do Isaaca Newtona, mojego bohatera, którego dom odwiedziłem w trakcie filmowania *Cosmos: A Spacetime Odyssey.*

Mamy zatem Ziemię krążącą wokół Słońca oraz Księżyc krążący wokół Ziemi, jak widać na ilustracji 2.3. Słońce umieściliśmy w dużej odległości z prawej strony, Ziemię w środku ilustracji, a Księżyc w kilku różnych położeniach wokół Ziemi. Patrzymy wzdłuż osi księżycowej orbity, a światło słoneczne pada z prawej strony.

Zarówno Ziemia, jak i Księżyc są częściowo (mniej więcej w połowie) oświetlone przez Słońce. W każdym momencie połowa Ziemi jest oświetlona, a połowa jest w cieniu, i podobnie Księżyc. Jeżeli stoisz na Ziemi i widzisz Księżyc, który znajduje się po przeciwnej stronie niż Słońce, to co widzisz? W jakiej fazie jest Księżyc? W pełni. Powiększone obrazy Księżyca na ilustracji 2.3 pokazują, w jaki sposób Księżyc jest widoczny z Ziemi w poszczególnych punktach swojej orbity.



ILUSTRACJA 2.3. Fazy Księżyca w trakcie ruchu wokół Ziemi. Słońce, po prawej, zawsze oświetla połowę Ziemi i połowę Księżyca. Diagram ilustruje sekwencję (przeciwnie do ruchu wskazówek zegara) położeń Księżyca w trakcie jego ruchu wokół Ziemi, z punktu widzenia obserwatora położonego na północ od płaszczyzny orbity. Księżyc jest zawsze skierowany tą samą stroną do Ziemi. Zwróć uwagę, że w nowiu oświetlona jest tylna strona Księżyca, której nigdy nie widzimy z Ziemi. Duże fotografie pokazują wygląd Księżyca obserwowanego z Ziemi w poszczególnych położeniach

Photo credit: Robert J. Vanderbei

Dlaczego co miesiąc nie obserwujemy zaćmienia Księżyca, wtedy gdy Ziemia znajduje się między Słońcem a Księżycem? Ponieważ orbita Księżyca wokół Ziemi jest nachylona około 5° względem orbity Ziemi wokół Słońca. Zatem gdy Księżyc znajduje się w pełni, zazwyczaj przechodzi na północ albo na południe od cienia Ziemi. Od czasu do czasu zdarza się jednak, że Księżyc w pełni przecina płaszczyznę orbity Ziemi, przechodząc przez cień Ziemi, i wtedy obserwujemy zaćmienie Księżyca.

Pozwólmy zatem Księżycowi kontynuować jego podróż wzdłuż orbity o kolejne 90°, przeciwnie do ruchu wskazówek zegara, aż znajdzie się w położeniu zwanym trzecią kwadrą, kolokwialnie zwaną półksiężycem — widzimy wtedy połowę tarczy Księżyca. Po przebyciu kolejnych 90° (wciąż przeciwnie do ruchu wskazówek zegara) Księżyc przechodzi między Słońcem a Ziemią. Oświetlona jest tylko ta strona Księżyca, która jest skierowana w stronę Słońca. Stojąc na Ziemi, nie widzimy tej strony, więc nie widzimy w ogóle Księżyca. Tę fazę Księżyca nazywamy nowiem. Gdy Księżyc znajduje się w nowiu, zazwyczaj przechodzi na północ albo na południe od Słońca. Od czasu do czasu zdarza się jednak, że Księżyc w nowiu przechodzi bezpośrednio na tle Słońca, i wtedy obserwujemy zaćmienie Słońca.

Jak dotąd mieliśmy Księżyc w pełni, Księżyc w trzeciej kwadrze, Księżyc w nowiu. Pozwólmy mu pokonać kolejne 90° i będziemy mieć Księżyc w pierwszej kwadrze, gdy ponownie oświetlona jest połowa tarczy Księżyca. Mamy także cztery pośrednie fazy. Co widzimy pomiędzy nowiem a pierwszą kwadrą? Niewielki fragment w kształcie sierpa. Nazywamy tę fazę młodym Księżycem lub sierpem przybywającym, ponieważ codziennie robi się większy. A tuż przed nowiem mamy sierp ubywający (stary Księżyc). Te dwa sierpy są

skierowane w przeciwnych kierunkach i także zachowanie jest przeciwne w obu przypadkach — Księżyc kurczy się przed nowiem, a po nowiu rośnie.

Między pierwszą kwadrą a pełnią mamy fazę zwaną przybywającym Księżycem garbatym. Ta faza — istotnie niezbyt piękna — nie cieszy się zainteresowaniem artystów, mimo że widzimy Księżyc w tej fazie w niemal połowie wszystkich możliwych sytuacji — nie całkiem w pełni, nie całkiem w kwadrze. Gdyby artyści malowali niebo w losowo wybranych momentach, powinniśmy widzieć garbaty Księżyc mniej więcej na co drugim obrazie, lecz najczęściej widzimy sierp lub Księżyc w pełni. Sztuka nie odzwierciedla wiernie rzeczywistości.

Cały ten cykl trwa przez miesiąc, stąd wzięła się dawna nazwa Księżyca — „miesiąc" (staroang. *moonth*). Jeżeli Księżyc w pełni jest po przeciwnej stronie względem Słońca, to o jakiej porze dnia Księżyc wschodzi? Jeżeli jest po przeciwnej stronie niż Słońce, a Słońce zachodzi, to oznacza, że Księżyc wschodzi. Księżyc w pełni wschodzi o zachodzie. A gdy Słońce wschodzi, Księżyc w pełni zachodzi.

Inaczej jest w innych fazach. Gdy Księżyc w trzeciej kwadrze jest wysoko na niebie, Słońce wschodzi. Na ilustracji 2.3 Ziemia wiruje przeciwnie do ruchu wskazówek zegara, wirujesz wraz nią i przechodzisz ze strefy nocnej do dziennej, gdy Księżyc w trzeciej kwadrze jest wysoko na niebie. Spróbuj wykonać następujący eksperyment myślowy — umieść swój mózg oraz oczy na „Ziemi" na ilustracji 2.3, popatrz dookoła, a następnie wróć do realnego świata i sprawdź rezultat.

Mam na pulpicie komputera aplikację, która pokazuje fazę Księżyca. To taki księżycowy zegar, który łączy mnie z Wszechświatem nawet wtedy, gdy gapię się na ekran komputera.

Wróćmy do Układu Słonecznego — w drugiej połowie XVI wieku w Danii żył bogaty astronom, Tycho Brahe. Jeden z kraterów na Księżycu nosi nazwę Tycho.

Swego czasu spędziłem godzinę w towarzystwie rodowitego Duńczyka, próbując w pocie czoła nauczyć się wymawiać nazwisko tego astronoma: tī'kō brä. Ale w Ameryce wymawiamy to oczywiście tak, jak nam podpowiadają reguły American English.

Tycho Brahe interesował się ruchami planet. Zbudował najlepszy, jak na ówczesne możliwości, instrument do obserwacji i pomiarów położenia planet. Wykonał najdokładniejsze pomiary położenia planet. Teleskopy zostały wynalezione dopiero na początku XVII wieku, więc Tycho stosował przyrządy bezsoczewkowe, zapisując położenie gwiazd i planet w funkcji czasu. Z czasem zbudował ogromną bazę danych. W prowadzeniu obserwacji pomagał mu zdolny asystent, niemiecki matematyk Johannes Kepler.

Kepler wykorzystał obserwacje Tychona i odkrył prawa rządzące ruchami planet. Kepler był pierwszym astronomem, który mógł stwierdzić: „Rozumiem ruchy planet. Potrafię sformułować prawa, które dokładnie opisują zachowanie planet". Przed Keplerem organizacja Wszechświata była prosta i oczywista: „Popatrzcie, gwiazdy krążą wokół nas. Słońce wschodzi i zachodzi. Księżyc wschodzi i zachodzi. My musimy być w centrum Wszechświata". To

nie tylko było proste i łatwe, to rzeczywiście tak wyglądało. Pochlebiało ludzkiemu ego, dowody wskazywały, że tak musi być, więc nikt nie powątpiewał — dopóki nie pojawił się polski astronom, Mikołaj Kopernik. Skoro Ziemia jest w środku, to co robią planety? Spoglądasz w niebo i co noc obserwujesz, jak Mars przemieszcza się na tle gwiazd. Hmm. Właśnie zwalnia. O, teraz się zatrzymał. A teraz porusza się wstecz (to tak zwany ruch wsteczny planet). I znowu ruszył do przodu. Dlaczego Mars wykonuje takie dziwne ruchy?

Kopernik usiłował dociec, co by było, gdyby to Słońce było w centrum Wszechświata, a Ziemia poruszałaby się wokół Słońca. No cóż, wtedy te ruchy do przodu i do tyłu można bardzo prosto wyjaśnić. Słońce jest w środku, Ziemia porusza się wzdłuż orbity wokół Słońca, jak samochód po torze wyścigowym. Planeta Mars jest trochę dalej od Słońca niż Ziemia, więc porusza się nieco wolniej, jak wolniejszy samochód na bardziej zewnętrznym torze. Gdy Ziemia wyprzedza Marsa na wewnętrznym torze, Mars przez chwilę oddala się we wstecznym lusterku, więc wygląda, jakby poruszał się wstecz. Jeżeli jedziesz szybkim pasem autostrady i wyprzedzasz wolniejsze auto jadące sąsiednim pasem, to ono wygląda, jakby oddalało się wstecz. Jeżeli umieścisz Słońce w środku, a Ziemia i Mars krążą wokół Słońca po kołowych orbitach, to wyjaśnia ruch wsteczny. W istocie to wyjaśnia wszystko, co widać na nocnym niebie. Planety bardziej oddalone od Słońca poruszają się wolniej. Kopernik opublikował to wszystko w dziele zatytułowanym *De revolutionibus orbium coelestium*. Gdybyś próbował kupić na aukcji egzemplarz pierwszego wydania tej książki, musiałbyś wydać ponad dwa miliony dolarów. To jest jedna z najważniejszych książek w całej historii ludzkości.

Została opublikowana w 1543 roku i wielu ludzi zainspirowała do myślenia. Początkowo Kopernik obawiał się ją publikować i kilku osobom udostępniał rękopis prywatnie. W owych czasach nie można było tak po prostu zacząć głosić wszem i wobec, że Ziemia nie jest już w centrum Wszechświata. Kościół katolicki miał na ten temat inne zdanie — że Ziemia jest w centrum — a opinii Kościoła nie można było zignorować.

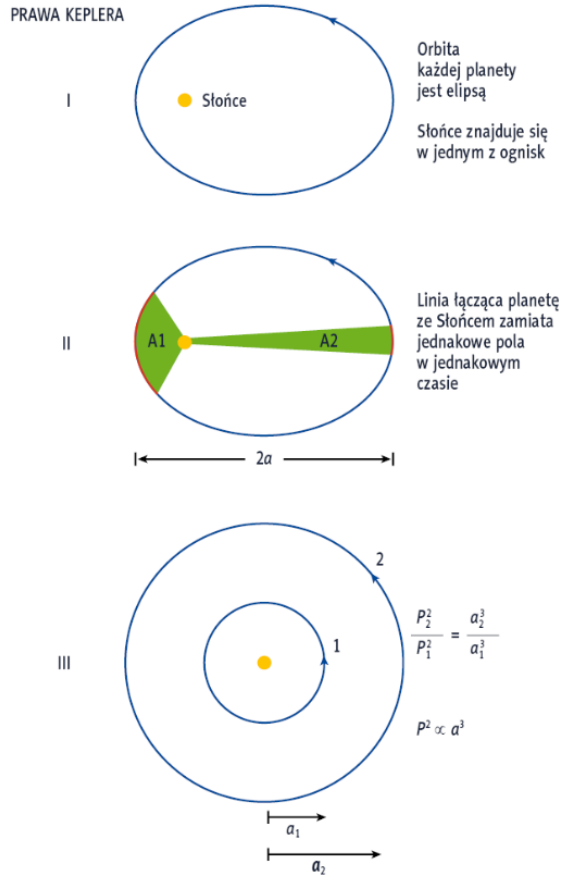
Tak stwierdził Arystoteles. W starożytnej Grecji był pewien astronom, Arystarch, który odgadł, że Ziemia krąży wokół Słońca, ale opinia Arystotelesa przeważyła, a Kościół przychylał się do tej opinii, ponieważ była zgodna z Pismem Świętym. Nie można skazać kogoś, kto nie żyje, więc Kopernik opublikował swoją książkę, gdy już leżał na łożu śmierci. Wprowadził do obiegu Słońce jako centrum Wszechświata oraz pojęcie modelu heliocentrycznego.

„Helio-" oznacza Słońce. Wcześniej obowiązywały modele geocentryczne, pochodzące od Arystotelesa, Ptolemeusza, a zadekretowane później przez Kościół.

W drugiej połowie XVI wieku pojawił się Kepler. Kepler zgadzał się i popierał poglądy Kopernika, z jednym zastrzeżeniem. Kopernik traktował orbity planet jako idealne okręgi, ale okręgi nie pasowały do obserwowanych ruchów planet, więc Kepler poprawił je, dodając mniejsze okręgi, zwane epicyklami (podobnie jak Ptolemeusz). To nadal nie pasowało do

obserwowanych ruchów planet na niebie, więc Kepler uznał, że model Kopernika wymaga uzupełnienia. Na podstawie danych — zaobserwowanych położeń planet — które pozostawił mu Tycho Brahe, Kepler wydedukował trzy prawa dotyczące ruchów planet. Obecnie nazywamy je prawami Keplera.

Pierwsze prawo Keplera mówi: planety krążą po elipsach, nie po okręgach (zob. il. 2.4). Co to jest elipsa? W matematyce okrąg ma jeden środek, natomiast elipsa w pewnym sensie ma dwa środki: nazywamy je ogniskami. Wszystkie punkty okręgu są jednakowo odległe od środka okręgu, natomiast w przypadku elipsy suma odległości od obu ognisk jest taka sama dla każdego punktu elipsy. Okrąg jest w istocie granicznym przypadkiem elipsy, w której oba ogniska znajdują się w tym samym miejscu. Ogniska wydłużonej elipsy są oddalone od siebie. Gdy odległość ognisk się zmniejsza, kształt elipsy coraz bardziej przypomina kształt okręgu.



ILUSTRACJA 2.4. Prawa Keplera. Odległość *a*, zwana półosią wielką, jest równa połowie dłuższej średnicy elipsy. Dla kołowej orbity, dla której ekscentryczność (mimośród) jest równa zeru, półoś wielka jest równa promieniowi koła

Credit: J. Richard Gott

Według Keplera planety poruszają się po elipsach, ze Słońcem w jednym z ognisk elipsy. To rewolucyjna idea. Grecy uważali, że Wszechświat jest dziełem bogów, a zatem musi być doskonały. Mieli bardzo określone poglądy w kwestii, co to znaczy być doskonałym. Kształt okręgu jest doskonały: każdy punkt okręgu leży w takiej samej odległości od środka; to oznacza doskonałość. Każdy ruch w boskim Wszechświecie musi się odbywać wzdłuż doskonałych orbit, zatem gwiazdy muszą się poruszać po okręgach. Ta filozofia przyrody przetrwała tysiące lat, po czym pojawił się Kepler, który stwierdził, że jest w posiadaniu danych pozostawionych przez Tychona, które wskazują, że to nie są okręgi, lecz elipsy.

Kepler udowodnił również, że prędkość planety na orbicie zależy od odległości od Słońca. Jeżeli orbita jest kołowa, to nie ma powodu, aby prędkość była różna w różnych fragmentach orbity, więc planeta porusza się cały czas ze stałą prędkością. Lecz gdy orbita jest eliptyczna, prędkości są różne. W której części orbity prędkość jest największa? Jak łatwo odgadnąć, wtedy, gdy planeta jest najbliżej Słońca. Kepler odkrył, że planety poruszają się szybciej, gdy są blisko Słońca, a wolniej, gdy są od niego dalej.

Rozważając problem geometrycznie, Kepler stwierdził: „zmierzmy, jak daleko planeta dotrze, powiedzmy, w ciągu miesiąca". Gdy jest blisko Słońca i porusza się szybko, w ciągu miesiąca przebiegnie fragment orbity, oznaczony czerwonym kolorem na ilustracji 2.4, i „zamiecie" wycinek elipsy oznaczony symbolem A1. Po pewnym czasie planeta znajdzie się w innym położeniu, bardziej oddalonym od Słońca. Kepler zaobserwował, że planety poruszają się wolniej, gdy są daleko od Słońca, więc w ciągu miesiąca nasza planeta przebiegnie krótszy fragment orbity, gdy znajduje się po prawej stronie orbity na ilustracji 2.4. W tej fazie ruchu wokół Słońca planeta w ciągu miesiąca „zamiecie" wycinek elipsy o innym kształcie, bardziej wąski i bardziej wydłużony, oznaczony symbolem A2. Kepler spostrzegł, że pole powierzchni „zamiecionej" w ciągu miesiąca było takie samo, niezależnie od tego, czy planeta była blisko czy daleko od Słońca: A1 = A2. Stąd wynika drugie prawo Keplera: planety zamiatają jednakowe pola w jednakowym czasie.

Obecnie potrafimy wyprowadzić drugie prawo Keplera z bardziej fundamentalnego prawa przyrody, zwanego zasadą zachowania momentu pędu. Nawet jeżeli nigdy się nie zetknąłeś z tą zasadą, możesz ją intuicyjnie zrozumieć.

Łyżwiarze wykorzystują tę zasadę, gdy wirują na lodzie. Zwykle zaczynają wirować z rękami rozłożonymi szeroko, a gdy już się rozkręcą, przyciągają ramiona do ciała, skracając tym samym odległość ramion od osi obrotu, w wyniku tego prędkość wirowania wzrasta. Gdy planeta porusza się wokół Słońca wzdłuż eliptycznej orbity, w pewnej fazie ruchu jej odległość od Słońca zaczyna się zmniejszać. W rezultacie prędkość planety wzrasta.

Są to konsekwencje prawa zwanego zasadą zachowania momentu pędu. Kepler nie znał tego sformułowania, ale de facto odkrył to prawo.

Swoje pierwsze i drugie prawo Kepler odkrył niemal z dnia na dzień, natomiast trzecie prawo stanowiło ukoronowanie ponad dziesięciu lat ciężkiej pracy. Próbował znaleźć związek między odległością planety od Słońca a czasem, jaki jest jej potrzebny do przebiegnięcia całej orbity, czyli tak zwanego okresu obiegu. Zewnętrzne planety potrzebują więcej czasu na wykonanie pełnego okrążenia, wewnętrzne obiegają Słońce w krótszym czasie.

Które planety były znane w czasach Keplera? Merkury, Wenus, Ziemia, Mars, Jowisz i ulubieniec wszystkich — Saturn.

Trzecioklasiści często wybierali Plutona jako swoją ulubioną planetę — co zapewne spowodowało, że trafiłem na czarną listę, gdy w Rose Center of Earth and Space zdegradowaliśmy status Plutona do lodowej kuli na peryferiach Układu Słonecznego.

Greckie słowo *planetes* tłumaczy się jako „wędrowiec". Dla starożytnych Greków Ziemia nie była planetą, ponieważ była uważana za środek Wszechświata. Ale Grecy znali jeszcze dwie „planety", których nie wymieniłem: Słońce i Księżyc. One także poruszały się na tle gwiazd, więc spełniały definicję planety. W rezultacie Grecy uważali siedem obiektów za planety. A siedem dni tygodnia zawdzięcza swoje nazwy owym siedmiu planetom, a raczej bogom, od których planety zostały nazwane. Niektóre są oczywiste: *Sunday* (ang. *Sun* — Słońce, *day* — dzień), *Monday* (ang. *Moon* — Księżyc). *Saturday* (sobota) to dzień Saturna. Żeby rozszyfrować pozostałe dni tygodnia, trzeba poszukać w innych językach. Na przykład piątek (ang. *Friday*) to *Frigg* (lub w innej wersji *Freyja*), nordycka bogini kojarzona z Wenus.

Kepler w końcu odkrył swoje równanie — pierwsze równanie kosmosu.

Zaczął od zmierzenia wszystkich odległości w jednostkach równych odległości Ziemi od Słońca.

Obecnie nazywamy tę odległość jednostką astronomiczną, w skrócie AU (ang. Astronomical Unit). Odległości planet od Słońca zmieniają się w czasie, w zależności od położenia planety na elipsie. Elipsa, czyli spłaszczony okrąg, ma dłuższą średnicę oraz krótszą średnicę, zwane odpowiednio wielką osią oraz małą osią. Kepler odgadł, że powinien przyjąć połowę długości wielkiej osi — obecnie zwaną półosią wielką — jako miarę odległości planety od Słońca. Jest to średnia z maksymalnej i minimalnej odległości planety od Słońca.

Należy jeszcze mierzyć czas w ziemskich latach, aby ostatecznie móc zapisać równanie, które zwiastowało początek matematycznego sformułowania praw rządzących kosmosem. Jeżeli użyjemy symbolu P na oznaczenie okresu planetarnego — czasu obiegu planety wokół Słońca, wyrażonego w ziemskich latach; oraz symbolu a na oznaczenie półosi wielkiej, czyli średniej z maksymalnej i minimalnej odległości planety od Słońca, wyrażonej w jednostkach AU, to otrzymamy wzór

$$P^2 = a^3,$$

czyli trzecie prawo Keplera[3]. Sprawdźmy, czy ono działa poprawnie dla Ziemi. Okres orbitalny Ziemi równa się 1. Średnia min-max odległość wynosi 1. W

rezultacie wzór dla Ziemi wygląda następująco: $1^2 = 1^3$. Czyli 1=1. Działa. To dobrze.

Ale skoro jest to wzór dla całego Układu Słonecznego, powinien działać także dla innych planet (a także dla dowolnych innych ciał krążących wokół Słońca), które były wówczas znane lub zostały odkryte później. Może Pluton? Kepler nie wiedział o istnieniu Plutona, więc rozważmy przypadek Plutona. Średnia min-max odległość Plutona od Słońca wynosi 39,264 AU. Prawo Keplera mówi zatem: $P^2 = 39{,}264^3$. Ile wynosi 39,264 podniesione do sześcianu? 60 531,8. Możesz to sprawdzić na kalkulatorze. Zatem okres orbitalny Plutona musi być równy pierwiastkowi kwadratowemu z 60 531,8, czyli 246,0, zaokrąglone do czterech cyfr. A ile faktycznie wynosi okres Plutona? 246,0 lat.

Niezły był ananas z tego Keplera.

Gdy Isaac Newton odkrył prawo grawitacji, użył równania $P^2 = a^3$, aby się przekonać, jak siła grawitacyjnego przyciągania zależy od odległości. Okazało się, że siła zmniejsza się jak odwrotność kwadratu odległości. Aby to obliczyć, zastosował rachunek różniczkowy, który zresztą uprzednio sam wynalazł. Newton uogólnił prawo Keplera i sformułował prawo, które stosuje się nie tylko do Słońca i planet, lecz do wszystkich ciał we Wszechświecie. Dowolne dwa ciała przyciągają się odkrytą przez Newtona siłą grawitacji:

$$F = Gm_a m_b/r^2,$$

gdzie G jest stałą, m_a i m_b to są masy owych dwóch ciał, a r jest ich odległością.

Z powyższego równania można wyprowadzić prawo Keplera jako szczególny przypadek. Można także wyprowadzić pierwsze i drugie prawo: że orbity planet są elipsami, a Słońce znajduje się w jednym z ognisk; i że każda planeta zamiata jednakowe pola w jednakowym czasie![4] Prawo grawitacji Newtona jest tak potężne, że można z niego wyprowadzić nie tylko trzy prawa Keplera, ale także znacznie więcej. Pozwala wyznaczyć siłę grawitacji między dowolnymi dwoma ciałami położonymi w dowolnych dwóch miejscach we Wszechświecie, zupełnie niezależnie od trajektorii ich ruchu. Newton rozszerzył nasze rozumienie kosmosu i sformułował opis ruchów planet, który sięga daleko poza cokolwiek, co Kepler był w stanie sobie wyobrazić. Newton wyprowadził ten wzór, zanim skończył dwadzieścia sześć lat. Newton odkrył prawa optyki, ustalił kolory widma słonecznego, odkrył, że kolory tęczy dają białe światło, gdy się je połączy. Wynalazł teleskop zwierciadlany. Wynalazł rachunek różniczkowy i całkowy. To wszystko zawdzięczamy Newtonowi.

Cały następny rozdział jest o Newtonie.

3 – Prawa Newtona

Michael A. Strauss

Kopernik dokonał wielkiego przełomu, wyjaśniając ruchy planet w kategoriach heliocentrycznego Wszechświata i umieszczając Słońce w centrum układu, który obecnie nazywamy Układem Słonecznym. Wszystkie planety, łącznie z Ziemią, poruszają się po orbitach wokół Słońca. Siedzimy na ruchomej platformie. Aby się przekonać, jak szybko Ziemia się porusza, musimy zmierzyć, jaką drogę przebiega w określonym czasie, a następnie podzielić tę drogę przez ten czas.

Jak widzieliśmy w rozdziale 2, Kepler udowodnił, że orbita Ziemi jest elipsą. W rzeczywistości orbity większości planet w naszym układzie słonecznym są zbliżone do okręgów, więc na razie zastosujemy przybliżenie, zgodnie z którym Ziemia okrąża Słońce po okręgu. Jedno okrążenie trwa rok, natomiast promień okręgu, czyli odległość od Słońca do Ziemi, jak wspomnieliśmy w poprzednim rozdziale, jest wielkością znaną w astronomii jako jednostka astronomiczna, w skrócie AU. AU jest w przybliżeniu równa 150 milionów kilometrów, czyli $1{,}5 \times 10^8$ kilometra.

Oznacza to, że przemierzamy okrąg o promieniu 150 milionów kilometrów w ciągu jednego roku. Obwód okręgu jest równy 2π razy promień. Liczba π jest w przybliżeniu równa 3 — astronomowie stosują takie przybliżenie, gdy z grubsza szacują jakieś wielkości. Musimy teraz podzielić obwód przez czas, czyli przez jeden rok.

Na potrzeby tego rachunku chcemy wyrazić ten rok w sekundach. Liczba sekund w roku wynosi 60 (sekund w minucie) razy 60 (minut w godzinie) razy 24 (godzin w dobie) razy 365 (dni w roku). Możesz pomnożyć te liczby na kalkulatorze albo przypomnieć sobie, jak Neil w rozdziale 1 wspomniał, że pił szampana w miliardowej sekundzie swojego życia i miał wtedy około trzydziestu jeden lat. To oznacza, że rok ma około 1/30 z miliarda, czyli około 30 milionów sekund. Zapiszemy ten przybliżony wynik jako $3{,}0 \times 10^7$ sekundy w roku.

Składając całość w jedno równanie, możemy obliczyć, że prędkość Ziemi w jej ruchu wokół Słońca wynosi $2\pi r$ / (1 rok) = $2 \times 3 \times (1{,}5 \times 10^8$ kilometra) / ($3{,}0 \times 10^7$ sekundy) = 30 kilometrów na sekundę. Tak szybko okrążamy Słońce. Zasuwamy jak mała ciężarówka! Wydaje nam się, że siedzimy nieruchomo, co może wyjaśnić, dlaczego dla starożytnych tak naturalne było twierdzenie, że znajdują się w centrum Wszechświata. Wydawało się to oczywiste. W rzeczywistości i Ziemia, i my wraz z nią poruszamy się na wiele sposobów. Ziemia codziennie obraca się wokół swojej osi. Okrąża Słońce w ciągu roku, podróżując z prędkością 30 kilometrów na sekundę. W II części tej książki zobaczymy, że Słońce także się porusza (niosąc wraz z sobą Ziemię i inne planety), wykonując kilka różnych ruchów, i to na kilka sposobów.

Kopernik stwierdził, że planety krążą wokół Słońca. Kepler wykorzystał wyniki obserwacji Tychona Brahe, aby wyznaczyć orbity planet oraz parametry tych orbit. Jak pokazaliśmy w rozdziale 2, Kepler wyprowadził trzy prawa z tych orbit. Isaac Newton, jeden z najwybitniejszych bohaterów naszej historii, potrafił z praw Keplera wydedukować prawo grawitacji, zgodnie z

nie napotka na drodze niczego, co mogłoby je zatrzymać. Newton ujął to w formie podstawowego prawa przyrody.

Drugie prawo Newtona mówi, co się dzieje, gdy na ciało działa jakaś siła. Może równocześnie działać wiele różnych sił, lecz istotna jest ich suma — to suma decyduje o zmianie prędkości ciała. Używamy określenia „przyspieszenie", aby wyrazić zmianę prędkości: przyspieszenie stanowi miarę zmiany prędkości w jednostce czasu. Drugie prawo Newtona określa związek przyspieszenia z działającą na ciało siłą. Gdy popychasz jakiś obiekt z pewną siłą, obiekt przyspiesza. Jeżeli masa obiektu jest niewielka, przyspieszenie będzie znaczne. Jeżeli masa obiektu jest duża, przyspieszenie będzie niewielkie, przy tej samej sile. Ten związek wyraża najbardziej znane prawo Newtona, $F = ma$; siła jest równa iloczynowi masy i przyspieszenia.

Trzecie prawo Newtona można kolokwialnie ująć jako „jeżeli ty popychasz mnie, to ja popycham ciebie". Jeżeli jedno ciało działa siłą na inne ciało, to to drugie ciało działa na pierwsze z taką samą siłą, lecz w przeciwnym kierunku. Jeżeli naciskasz ręką blat stołu, czujesz nacisk stołu na rękę; stół działa na rękę z taką samą siłą, lecz w przeciwnym kierunku. Każdej sile towarzyszy przeciwna siła o tej samej wartości.

Jeżeli trzymasz na dłoni jabłko, to czy na jabłko działają jakieś siły? Tak, Ziemia działa na jabłko siłą grawitacji. Zatem jabłko powinno przyspieszać w stronę Ziemi, a przecież tego nie robi. Jabłko jest nieruchome, ponieważ twoja dłoń (dzięki twoim mięśniom) działa na nie siłą skierowaną do góry. Zgodnie z trzecim prawem Newtona jabłko działa na twoją dłoń siłą skierowaną w dół; nazywamy tę siłę ciężarem jabłka. Ziemia działa na jabłko siłą grawitacji skierowaną w dół, twoja dłoń działa na jabłko siłą skierowaną do góry — te dwie siły się wzajemnie równoważą, ich suma wynosi zero. Zero sił oznacza zero przyspieszenia zgodnie z drugim prawem Newtona, więc nieruchome jabłko pozostaje nieruchome.

W rzeczywistości sytuacja jabłka jest znacznie bardziej interesująca. Uprzednio policzyliśmy, że Ziemia krąży po okręgu wokół Słońca z prędkością 30 kilometrów na sekundę, a zatem jabłko porusza się z taką samą prędkością. Aby to przeanalizować, musimy teraz zrobić dygresję na temat ruchu po okręgu.

Ruch ze stałą szybkością po okręgu nie jest ruchem jednostajnym, ponieważ kierunek ruchu Ziemi nieustannie się zmienia, w miarę jak przemieszcza się ona po okręgu. Gdyby kierunek się nie zmieniał, Ziemia poleciałaby w przestrzeń po linii prostej, a nie po okręgu. Przyspieszenie, które wynika z ruchu po okręgu, jest każdemu z nas znane z codziennego życia. W parkach rozrywki można przejechać się rozmaitymi wagonikami, które pozwalają nam namacalnie poczuć przyspieszenie, gdy raptownie zakręcają.

Newton wykorzystał wynaleziony przez siebie rachunek różniczkowy, aby obliczyć przyspieszenie ciała, które porusza się po okręgu o promieniu r z ustaloną szybkością v. To przyspieszenie wynosi v^2/r i jest skierowane do środka okręgu. To pozornie nieruchome jabłko, które leży na twojej dłoni, w rzeczywistości porusza się z szybkością 30 kilometrów na sekundę po ogromnym okręgu, a zatem ulega przyspieszeniu. Z drugiego prawa Newtona

wiemy zatem, że na jabłko musi działać jakaś siła. Tą siłą jest grawitacyjne przyciąganie Słońca. Słońce przyciąga Ziemię w jej ruchu po orbicie i przyciąga także jabłko. Grawitacja Słońca działa na Ziemię, na jabłko, na ciebie i na mnie.

Wszyscy poruszamy się z szybkością 30 kilometrów na sekundę wokół Słońca. Przy tak ogromnej szybkości można by oczekiwać, że i przyspieszenie będzie znaczne, ale w rzeczywistości jest ono niewielkie, ponieważ promień okręgu jest bardzo duży. Policzmy to przyspieszenie. Szybkość wynosi 30 kilometrów na sekundę, czyli 30 tysięcy metrów na sekundę. Promień orbity Ziemi wynosi 150 000 000 000 metrów. Korzystając ze wzoru v^2/r, przyspieszenie a wynosi (30 tysięcy metrów na sekundę)^2/ 150 000 000 000 metrów = 0,006 metra na sekundę^2, czyli 0,006 metra na sekundę na sekundę. Oznacza to, że w każdej sekundzie prędkość zmienia się o 6 milimetrów na sekundę. To bardzo mało. Galileusz obliczył, że przyspieszenie ciała spadającego z wieży na ziemię pod wpływem ziemskiej grawitacji wynosi około 9,8 metra na sekundę na sekundę. To znacznie więcej. Mimo że Ziemia porusza się wokół Słońca z bardzo dużą prędkością, przyspieszenie jest niewielkie. W parku rozrywki kolejki nie jeżdżą wprawdzie z prędkością 30 kilometrów na sekundę, lecz promienie zakrętów są małe; gdy we wzorze v^2/r promień w mianowniku jest mały, wynikające ze wzoru przyspieszenie może być całkiem duże i natychmiast odczujemy jego skutek (dla przykładu, w kolejce jadącej z prędkością 10 metrów na sekundę po okręgu o promieniu 10 metrów przyspieszenie dośrodkowe wynosi 10 metrów na sekundę na sekundę).

Sytuacja jest nieco bardziej subtelna, gdy próbujemy zaobserwować przyspieszenie wynikające z przyciągania Słońca. Grawitacja Słońca działa na wszystko na Ziemi — na ciebie, na książkę, którą czytasz, na jabłko w twojej dłoni — w takim samym stopniu. Wszyscy znajdujemy się na swobodnej orbicie wokół Słońca. Nie poruszamy się względem obiektów znajdujących się wokół nas. Wydaje ci się, że jesteś nieruchomy; nie dostrzegasz, że jesteś w ruchu; nie dostrzegasz, że podlegasz przyspieszeniu.

Nie zmienia to faktu, że Ziemia przyspiesza w stronę Słońca z przyspieszeniem równym v^2/r. Newton użył trzeciego prawa Keplera, aby policzyć, jak przyspieszenie na orbicie wokół Słońca zależy od promienia orbity. Aby obliczyć okres obrotu planety P, należy podzielić długość orbity ($2\pi r$) przez jej prędkość v

$$P = (2\pi r/v).$$

W rezultacie:

- okres P jest proporcjonalny do r/v,
- kwadrat okresu P^2 jest proporcjonalny do r^2/v^2.

Kepler pokazał, że P^2 jest proporcjonalny do a^3, gdzie a jest półosią wielką orbity. Orbita Ziemi jest zbliżona do okręgu, więc możemy w przybliżeniu napisać $r = a$ i w rezultacie, podstawiając r za a, dostaniemy:

- P^2 jest proporcjonalny do r^3.

A skoro P^2 jest także proporcjonalny do r^2/v^2, to

• r^2/v^2 jest proporcjonalne do r^3.

Dzieląc obie strony przez *r*, dostajemy:

• *r/v2* jest proporcjonalne do r^2.

Bierzemy odwrotności obu stron:

• v^2/r (przyspieszenie) jest proporcjonalne do $1/r^2$.

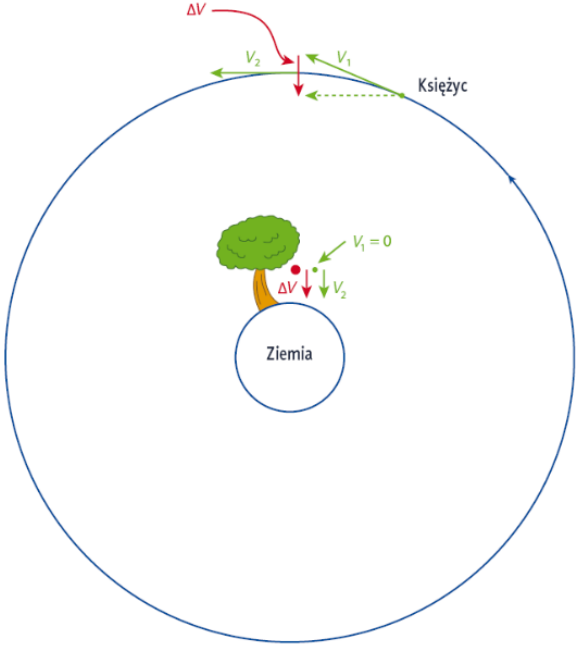
W kilku krokach, korzystając z trzeciego prawa Keplera i prostych algebraicznych przekształceń, pokazaliśmy, że grawitacyjne przyspieszenie, a zatem także siła, z jaką Słońce działa na ciało odległe o *r*, jest proporcjonalna do odwrotności kwadratu tej odległości — a to jest Newtonowskie prawo „odwrotnych kwadratów", czyli prawo grawitacji. Zacytuję samego Newtona:

> 'I was in the prime of my age for invention & minded Mathematicks & Philosophy more than any time since' [my] ensuing deduction 'from Kepler's rule of the periodical times of the Planets being in a sesquialterate proportion of their distances from the centers of their Orbs' that 'the forces which keep the Planets in their Orbs must [be] reciprocally as the squares of their distances from the centers about which they revolve'[6][7].

Newton zastosował to prawo do oddziaływania Ziemi i Księżyca. Przypomnijmy sobie owo słynne jabłko, które zainspirowało Newtona. Znajdowało się ono w odległości jednego promienia Ziemi od środka Ziemi i spadało w kierunku Ziemi z przyspieszeniem 9,8 metra na sekundę na sekundę. Księżyc znajduje się w odległości sześćdziesięciu promieni Ziemi. Skoro siła grawitacji Ziemi zmniejsza się z odległością jak $1/r^2$ (tak jak w przypadku Słońca), na orbicie Księżyca grawitacyjne oddziaływanie Ziemi powinno generować przyspieszenie $(60)^2$ razy mniejsze niż 9,8 metra na sekundę na sekundę, czyli około 0,00272 metra na sekundę na sekundę.

Podobnie jak w przypadku ruchu Ziemi wokół Słońca możemy także obliczyć przyspieszenie Księżyca w jego ruchu wokół Ziemi, znając jego okres obiegu (27,3 doby) oraz promień orbity (384 tysiące kilometrów). Podstawiając te liczby do v^2/r, otrzymujemy przyspieszenie 0,00272 metra na sekundę na sekundę. Eureka! Piękna zgodność z wynikiem obliczonym za pomocą jabłka. Jak stwierdził Newton, dwa wyniki „są całkiem bliskie". Taka sama siła, która przyciąga jabłko w kierunku Ziemi, przyciąga także Księżyc w kierunku Ziemi, odciągając trajektorię Księżyca od linii prostej i utrzymując Księżyc na niemal kołowej orbicie wokół Ziemi. Grawitacja, która spowodowała upadek owego jabłka na ziemię, rozciąga się aż po orbitę Księżyca. Newton to odkrył, gdy mieszkał w domu swojej babki, w czasie gdy uniwersytet w Cambridge był zamknięty z powodu zarazy, lecz nie opublikował tego odkrycia. Możliwe, że zaniepokoiła go niewielka niezgodność między wynikami rachunków i obserwacji wynikająca z faktu, że

nie dysponował dokładnym pomiarem promienia Ziemi. Dopiero wiele lat później Edmund Halley (ten od komety) nakłonił Newtona do ogłoszenia swego odkrycia.



ILUSTRACJA 3.1. Przyspieszenie Księżyca oraz spadającego z drzewa Newtonowskiego jabłka. Zwróć uwagę, że w obu przypadkach przyspieszenie (zmiana prędkości) jest skierowane do środka Ziemi

Credit: J. Richard Gott

Newton sformułował prawo — zwane czasem szumnie uniwersalnym prawem grawitacji — omówione w rozdziale 2. Rozważmy dwa obiekty, na przykład Ziemię i Słońce. Odległość między nimi (1 AU, czyli $1{,}5 \times 10^8$ km) jest około stu razy większa niż średnica samego Słońca ($1{,}4 \times 10^6$ km). Ich masę oznaczmy odpowiednio symbolami M_E i M_S.

Newton odkrył, że siła grawitacji między tymi dwoma ciałami jest proporcjonalna do masy każdego z nich oraz do odwrotności kwadratu ich odległości r (w swoim rozumowaniu wykorzystał trzecie prawo Keplera, jak opisaliśmy wyżej). Słowo „proporcjonalna" oznacza, że potrzebna jest stała proporcjonalności G, na cześć sir Isaaca zwana stałą Newtona. Oto wzór Newtona na siłę działającą między Słońcem i Ziemią:

$F = GM_SM_E/r^2$.

Siła jest przyciągająca: jedno ciało przyciąga drugie, a zatem siła jest skierowana od jednego ciała w kierunku drugiego.

Z trzeciego prawa Newtona wyciągamy wniosek, że powyższy wzór określa zarówno siłę, z jaką Słońce przyciąga Ziemię, jak i siłę, z jaką Ziemia przyciąga Słońce. Masa Słońca jest jednak wielokrotnie większa od masy Ziemi, a drugie prawo Newtona mówi, że przyspieszenie jest równe sile podzielonej przez masę. W rezultacie przyspieszenie Ziemi jest wielokrotnie większe od przyspieszenia Słońca, co powoduje, że ruch Słońca pod wpływem tej siły jest niewielki w porównaniu z ruchem Ziemi (w rzeczywistości sytuacja jest jeszcze trochę bardziej skomplikowana: wszystkie ciała Układu Słonecznego

— od Słońca i Jowisza po najmniejsze asteroidy — krążą wokół ich wspólnego środka masy).

A oto jeszcze jedna fascynująca konsekwencja wzoru Newtona. Zgodnie z drugim prawem Newtona siła grawitacji, którą przed chwilą zapisaliśmy, jest równa masie Ziemi (M_E) pomnożonej przez przyspieszenie. Dla ruchu po okręgu przyspieszenie jest równe v^2/r. Zatem wzór $F = ma$ może być zapisany jako:

$$GM_S M_E/r^2 = M_E v^2/r.$$

Zwróć uwagę, że masa Ziemi występuje po obu stronach tego wzoru, więc możemy obie strony wzoru podzielić przez M_E, co daje:

$$GM_S/r^2 = v^2/r.$$

Oznacza to, że przyspieszenie Ziemi ($GM_S/r^2 = v^2/r$) nie zależy od masy Ziemi. To godny uwagi fakt. Przyspieszenie pod wpływem grawitacji nie zależy od masy obiektu podlegającego przyspieszeniu, i dotyczy to zarówno ciał krążących po orbitach wokół Słońca, jak i ciał spadających w polu grawitacyjnym Ziemi. Masa ciała występuje po obu stronach wzoru $F = ma$, zatem może zostać wyeliminowana z równania. Jeżeli równocześnie upuszczę książkę i kartkę papieru, to będą ulegały takiemu samemu przyspieszeniu, więc będą spadały w takim samym tempie, mimo że książka jest znacznie cięższa. Galileusz stwierdził, że tak byłoby w próżni. Czy to działa w praktyce? Nie, książka i kartka papieru opadają w różnym tempie ze względu na opór powietrza. Opór powietrza działa z taką samą siłą na książkę i na kartkę, lecz książka jest znacznie cięższa od kartki, więc wpływ oporu powietrza na przyspieszenie książki jest mały — w zasadzie zaniedbywalny. Jeżeli jednak położę kartkę papieru na wierzchu książki, tak aby książka blokowała działanie oporu powietrza na kartkę, i ponownie je upuszczę, kartka pozostanie na wierzchu książki i będą opadać razem. Spróbuj sam wykonać taki eksperyment!

Gdy załoga Apollo 15 leciała na Księżyc, zabrali ze sobą młotek i piórko, aby wykonać ten eksperyment. Księżyc w zasadzie nie ma atmosfery — nad jego powierzchnią istnieje bardzo dobra próżnia, więc nie ma oporu powietrza. Gdy astronauci upuszczali młotek i piórko, oba opadały równocześnie, dokładnie w takim samym tempie, dokładnie tak, jak przewidzieli Newton i Galileusz. W Internecie można znaleźć zapis wideo tego księżycowego eksperymentu.

Zapewne wiesz, że Arystoteles się mylił w tej kwestii. Arystoteles stwierdził, że bardziej masywne obiekty będą się poruszać z większym przyspieszeniem i szybciej spadną na ziemię. Stwierdził tak, ponieważ wydawało mu się to logiczne, lecz nigdy nie wykonał doświadczenia, aby się przekonać, czy jego koncepcja jest poprawna. Mógł upuścić duży i mały kamień (opór powietrza jest bardzo mały w przypadku kamieni, niezależnie od wielkości), aby się przekonać, że spadają w takim samym tempie. Wniosek jest taki, że w nauce zawsze należy eksperymentalnie weryfikować, czy intuicja jest poprawna!

Zajmijmy się teraz pokrewnym problemem. Rozważmy siłę grawitacji działającą na jabłko, które trzymasz w dłoni na końcu wyciągniętej ręki. Wzór Newtona zawiera odległość *r* jabłka od Ziemi. Można by naiwnie sadzić, że powinniśmy podstawić odległość od jabłka do podłogi, około dwóch metrów. Okazuje się jednak, że to błędne podejście. Newton zdawał sobie sprawę, że musi uwzględnić grawitacyjne oddziaływanie każdego fragmentu Ziemi: nie tylko kawałka pod naszymi stopami, lecz także tych fragmentów, które znajdują się po drugiej stronie globu. Około dwudziestu lat zajęło mu wymyślenie, w jaki sposób należy wykonać te obliczenia. Musiał dodać wszystkie siły od wszystkich fragmentów Ziemi, uwzględniając ich odległość od jabłka oraz kąty między siłami. Aby te wszystkie siły dodać, musiał wymyślić i zastosować nową gałąź matematyki, zwaną obecnie rachunkiem całkowym. Ostateczny rezultat tych rachunków jest bardzo nieintuicyjny — grawitacja sferycznego obiektu (takiego jak Ziemia) jest taka sama, jaka byłaby, gdyby cała masa obiektu była skoncentrowana w jego środku. Aby policzyć siłę grawitacji działającą na jabłko, musisz wyobrazić sobie, że cała masa Ziemi jest skupiona w punkcie położonym 6371 kilometrów pod twoimi stopami, czyli w odległości od powierzchni do środka Ziemi. Uwzględniliśmy już (milcząco) wynik powyższego rozumowania, gdy omawialiśmy porównanie spadającego jabłka z Księżycem krążącym na orbicie wokół Ziemi.

Ale ruch jabłka spadającego (prosto w dół) z pewnością nie przypomina orbitalnego ruchu Księżyca. Dlaczego Księżyc krąży po okręgu, a jabłko po prostu spada na ziemię? Aby umieścić jabłko na orbicie, musiałbym mocno rzucić je poziomo — tak mocno, aby okrążyło Ziemię. Rozważmy przypadek Kosmicznego teleskopu Hubble'a, który krąży zaledwie kilkaset kilometrów nad powierzchnią Ziemi. Teleskop wykonuje jedno pełne okrążenie, 25 tysięcy mil (40 tysięcy km), w ciągu około 90 minut. Jeżeli przeliczymy to na prędkość, wyjdzie około 5 mil na sekundę. Aby umieścić jabłko na orbicie, musiałbym zatem rzucić je poziomo z prędkością około 5 mil na sekundę.

Wyobraź sobie, że stoisz na szczycie wysokiej góry, powyżej granicy atmosfery (aby uniknąć oporu powietrza) i rzucasz poziomo jabłkami, nadając im coraz większe prędkości. Rzucasz tak mocno, jak potrafisz — jabłko szybko spada na ziemię. Rzuca miotacz z czołowej drużyny bejsbolowej — poleci trochę dalej, ale też spadnie. Następnie rzuca Superman. Za każdym razem coraz mocniej. Kolejne jabłka lecą coraz dalej, zanim trajektorie ich lotu przetną powierzchnię Ziemi. Ale powierzchnia Ziemi nie jest płaska — w dużej odległości widoczne jest jej zakrzywienie. Gdy w końcu Superman rzuci jabłko z prędkością 5 mil na sekundę, będzie ono opadać w kierunku ziemi pod wpływem grawitacji, lecz teraz jego zakrzywiona trajektoria pasuje do krzywizny Ziemi. W rezultacie nigdy nie spadnie na Ziemię, lecz pozostanie na kołowej orbicie. Obiekt krążący wzdłuż orbity wokółziemskiej cały czas „spada" w kierunku Ziemi, lecz równocześnie biegnie do przodu. Gdy upuścisz jabłko, spada prosto w dół w wyniku działania grawitacji Ziemi. Ta sama grawitacja trzyma Kosmiczny teleskop Hubble'a oraz Księżyc na orbicie wokółziemskiej (Księżyc jest na znacznie wyższej orbicie, zatem porusza się wolniej). Obiekt krążący na niskiej orbicie spada w kierunku Ziemi w takim

tempie, że nigdy nie trafi w Ziemię, gdyż uniemożliwi mu to krzywizna powierzchni Ziemi. Newton doskonale to rozumiał i wysunął pomysł sztucznego satelity na orbicie wokół Ziemi — dwieście siedemdziesiąt lat przed faktyczną realizacją tego pomysłu!

Jeżeli kiedykolwiek byłeś w windzie, która raptownie ruszyła w dół, przez krótki czas spadałeś, a wszystko wokół ciebie spadało wraz z tobą. Gdy upuszczasz jabłko, nie spadasz wraz z nim, ponieważ nacisk gruntu na twoje podeszwy utrzymuje cię w miejscu. Stoisz nieruchomo względem swojego otoczenia, natomiast jabłko spada pod wpływem grawitacji. Gdybym cię popchnął i przewrócił, widziałbym, jak spadasz wraz z jabłkiem (przynajmniej do momentu, gdy wraz z jabłkiem uderzyłbyś o podłoże).

Widziałeś zapewne obrazy lub filmy przedstawiające astronautów na pokładzie Międzynarodowej Stacji Kosmicznej. Grawitacja Ziemi działa jednakowo na astronautów i na Międzynarodową Stację Kosmiczną. Wszystko, co znajduje się na Stacji (oraz sama Stacja) spada w takim samym tempie — przypomnij sobie obliczenia, w których wykazaliśmy, że przyspieszenie pod wpływem grawitacji nie zależy od masy obiektu na orbicie. Gdy wszystko spada w tym samym tempie, astronauci odczuwają „nieważkość". Twój ciężar to liczba, która wyskakuje na skali łazienkowej wagi, gdy stoisz na niej w swojej łazience (naciskasz na wagę, dociskając ją do podłogi, a trzecie prawo Newtona mówi, że waga naciska na ciebie). Ale jeżeli twoja łazienka jest na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej, to twoja waga spada razem z tobą (i z podłogą), nie naciskasz na wagę, a waga pokazuje zero. Jesteś „nieważki".

To jednak nie oznacza, że twoja masa jest równa zeru. Masa i ciężar to nie to samo! Według Newtona masa to jest wielkość, która występuje w jego drugim prawie (tym, które wiąże siłę, masę i przyspieszenie); jest to także wielkość, która jest źródłem grawitacji. Gdy ktoś mówi, że chce schudnąć, aby zmniejszyć swoją „wagę", w rzeczywistości ma na myśli zmniejszenie swojej masy. Chodzi o pozbycie się części tłuszczu, ponieważ tłuszcz ma masę. Zmniejszywszy masę, można przy takiej samej sile szybciej przyspieszać i ogólnie łatwiej się poruszać (i słabiej naciskać na wagę).

Podsumujmy teraz osiągnięcia Newtona. Z ówcześnie dostępnych obserwacji ruchów planet Kepler wyprowadził swoje trzy prawa opisujące orbity planetarne. Następnie pojawił się Newton i podszedł do tego zagadnienia w zupełnie inny sposób — podjął próbę zrozumienia, jak porusza się wszystko, nie tylko sześć znanych wówczas planet, i wyprowadził swoje trzy prawa. Ponadto podjął próbę zrozumienia siły grawitacji, najważniejszej siły w astronomii. Korzystając z trzeciego prawa Keplera, udowodnił, że siła grawitacji zależy od odległości jak $1/r^2$. Odkrył, że siła grawitacyjnego oddziaływania dwóch ciał ma charakter przyciągający. Słońce przyciąga planety z siłą $F = GM_S M_{Planet}/r^2$. Wykonując odpowiednie przekształcenia, pokazaliśmy, że można wyjaśnić trzecie prawo Keplera w kategoriach Newtonowskiego prawa ruchu oraz prawa grawitacji. W ramach newtonowskiej fizyki Newton sformułował bardziej ogólne ujęcie praw Keplera niż sam Kepler.

Kolejny triumf Newtona nastąpił wtedy, gdy udowodnił, że z jego prawa grawitacji wynika, iż planety krążą po eliptycznych orbitach, ze Słońcem w jednym z ognisk, a linia łącząca planetę ze Słońcem zakreśla jednakowe pola w jednakowym czasie. Wszystkie trzy prawa Keplera mogą teraz być postrzegane jako konsekwencja Newtonowskiego prawa grawitacji oraz trzech Newtonowskich praw ruchu.

Prawa Newtona były pierwszymi prawami fizyki zapisanymi w języku matematyki, które pozwalały przewidywać ruchy ciał oraz testować owe przewidywania. Halley użył praw Newtona, aby udowodnić, że wiele komet zaobserwowanych w ciągu kilku stuleci (łącznie z kometą z 1066 roku, wyhaftowaną na tkaninie z Bayeux) to w rzeczywistości była jedna i ta sama kometa poruszająca się po bardzo wydłużonej orbicie eliptycznej i powracająca mniej więcej raz na siedemdziesiąt sześć lat. Okres ten nie był jednak całkowicie niezmienny, ponieważ ruch komety (i zarazem czas jej powrotu) zaburzały Jowisz i Saturn, gdy przecinała ich orbity. Owe odchylenia można było przewidzieć dzięki prawom Newtona, natomiast z praw Keplera wynikał dokładnie periodyczny ruch. Halley obliczył, że kometa powróci ponownie w 1758 roku, lecz nie doczekał potwierdzenia swoich przewidywań, ponieważ zmarł w 1742 roku. Gdy kometa faktycznie pojawiła się w 1758 roku, nazwano ją jego imieniem: kometa Halleya. Korzystając z praw Newtona, Alexis Clairaut, Jérôme LaLande oraz Nicole-Reine Lepaute przewidzieli jej przejście w pobliżu Słońca z dokładnością do jednego miesiąca. Było to godne uwagi potwierdzenie praw Newtona.

Prawa Newtona doczekały się jeszcze jednego spektakularnego sukcesu. Planeta Uran nie poruszała się dokładnie tak, jak przewidywały prawa Newtona. Wydawało się, że jej orbita jest zaburzona. Urbain Le Verrier odkrył, że zaburzenia można by wyjaśnić, gdyby na Urana działała grawitacja jakiejś niewidocznej planety jeszcze bardziej oddalonej od Słońca. Przewidział, gdzie można będzie ją dostrzec i w 1846 roku Johann Gottfried Galle i Heinrich Louis d'Arrest, korzystając z tych przewidywań, dostrzegli tę planetę w położeniu oddalonym zaledwie o 1° od miejsca, które przewidział Le Verrier. Prawa Newtona zostały wykorzystane do odkrycia nowej planety: Neptuna. Reputacja Newtona poszybowała do nieba.

W kolejnych rozdziałach, pogłębiając zrozumienie Wszechświata, będziemy wielokrotnie wracać do tych podstawowych pojęć dotyczących sił, oddziaływań i grawitacji.

4 – Jak gwiazdy emitują promieniowanie i energię (I)

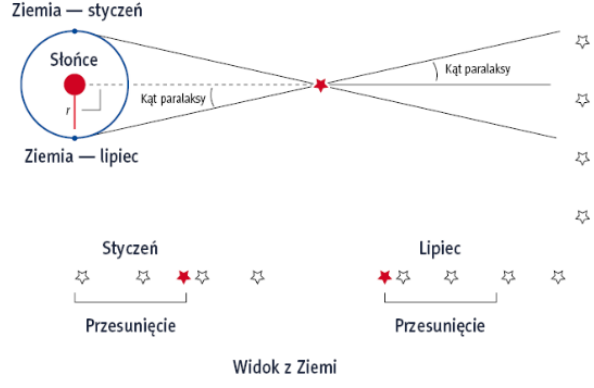
Neil deGrasse Tyson

Podejmiemy teraz próbę zrozumienia oraz ogarnięcia wyobraźnią odległości do gwiazd. Wiemy już, że odległość od Ziemi do Słońca, 150 milionów

kilometrów (czyli 1 AU), jest około stu razy większa niż średnica Słońca. Wyobraźmy sobie teraz, że skalujemy wszystkie rozmiary tak, aby odległość Ziemia–Słońce wynosiła 1 metr. Słońce ma wtedy średnicę 1 centymetra. Najbliższe gwiazdy są oddalone o 200 tysięcy AU, co w naszej skali oznacza 200 kilometrów. W porównaniu z rozmiarami gwiazd przestrzeń między nimi jest ogromna. Przekonamy się, że wygodnie jest mierzyć te odległości nie w kilometrach lub centymetrach, lecz w kategoriach czasu, jaki potrzebuje światło, aby je przebyć.

Prędkość światła, którą oznaczamy literą c, wynosi 3×10^8 metra na sekundę. Jest to kolejna liczba, którą warto zapamiętać. W rozdziale 17 wyjaśnimy szczegółowo, dlaczego ta prędkość reprezentuje kosmiczną granicę prędkości. Światło jest najszybszym obiektem we Wszechświecie. Obserwujemy gwiazdy, rejestrując ich światło, więc jest to najbardziej naturalna jednostka odległości. Jedna sekunda świetlna to odległość, którą światło pokonuje w sekundę: 3×10^8 metra lub 300 tysięcy kilometrów — w przybliżeniu siedem razy więcej niż obwód Ziemi. Księżyc jest oddalony o 384 tysiące kilometrów, więc światło potrzebuje 1,3 sekundy, aby pokonać tę odległość. Mówimy, że Księżyc jest oddalony o 1,3 sekundy świetlnej. Odległość od Ziemi do Słońca wynosi około 8 minut świetlnych — tyle czasu światło słoneczne biegnie od Słońca do Ziemi. Najbliższe gwiazdy są oddalone około 4 lat świetlnych. Rok świetlny to nie jest miara czasu, lecz odległości — taką odległość światło przemierza w ciągu jednego roku. Jeden rok świetlny to około 10 bilionów kilometrów. Światło jednej z tych gwiazd, które widzimy dzisiaj, zostało wyemitowane cztery lata temu. We Wszechświecie zawsze spoglądamy wstecz w czasie. Widzimy te najbliższe gwiazdy nie takie, jakie są dzisiaj, lecz takie, jakie były cztery lata temu.

Tak samo jest w codziennym życiu. Prędkość światła, wyrażona w nieco innych jednostkach, wynosi około 1 stopy na nanosekundę. Dwie osoby siedzące przy stole widzą siebie nawzajem z opóźnieniem kilku nanosekund. To oczywiście zbyt małe opóźnienie, aby było zauważalne, ale każdy wizualny kontakt ma wbudowane opóźnienie czasowe.



ILUSTRACJA 4.1. Paralaksa. Gdy Ziemia okrąża Słońce, pobliska gwiazda zmienia położenie na niebie na tle odległych gwiazd

Credit: J. Richard Gott

Jak zmierzyć odległość do najbliższych gwiazd? Cztery lata świetlne to olbrzymia odległość. Nie możemy po prostu rozciągnąć taśmy mierniczej stąd do gwiazdy. Najpierw musimy poznać pojęcie paralaksy. Ziemia krąży wokół Słońca (zob. il. 4.1). W styczniu Ziemia znajduje się po jednej stronie Słońca, a sześć miesięcy później, w lipcu, po przeciwnej. Na prawo od układu Ziemia –Słońce znajduje się pewna pobliska gwiazda, a daleko po prawej stronie jest układ wielu bardzo odległych gwiazd. Są one tak oddalone, że powinny się znaleźć daleko poza obszarem ilustracji. Załóżmy teraz, że w styczniu wykonujemy fotografię owej sąsiedniej gwiazdy. Na fotografii zostaną uwiecznione wszystkie gwiazdy, które zmieściły się w kadrze, a jedną z nich będzie nasza sąsiadka (oznaczona czerwoną gwiazdką na ilustracji). Obraz nieba w styczniu jest przedstawiony w lewym dolnym rogu ilustracji. Na razie nie widzimy na nim nic szczególnego — kilka gwiazd na tle nieba. Nie wiemy, które z nich są blisko, a które daleko. Pół roku później, gdy Ziemia znajdzie się w innym miejscu, po przeciwnej stronie swojej orbity, ponownie wykonujemy fotografię tego samego obszaru nieba. Na fotografii widzimy ten sam układ gwiazd, lecz okazało się, że jedna z nich przemieściła się z położenia, które zajmowała w styczniu, do nowego położenia w lipcu. Inne gwiazdy w zasadzie znajdują się w tych samych miejscach, a ta jedna przeskoczyła w inne położenie. Co będzie za kolejne sześć miesięcy? Wróci tam, skąd przyszła. Przesunięcie gwiazdy będzie się powtarzać, tam i z powrotem, w zależności od pory roku, w której ją obserwujemy lub wykonujemy zdjęcie.

Instrukcja stereoskopowego widzenia obrazu 3D

Jak złożyć dwa dwuwymiarowe rysunki w trójwymiarowy obraz nieba

W rzeczywistym świecie każde z dwojga twoich oczu widzi świat z nieco innej perspektywy, co pozwala ci oceniać odległości. Możemy to wykorzystać, aby oszukać mózg — zobaczyć trójwymiarowy obraz, patrząc na dwuwymiarową stronicę książki. Na ilustracji 4.2 umieszczone są dwie fotografie. Należy doprowadzić do sytuacji, w której każde z dwojga oczu widzi tylko jedną. Fotografia po lewej stronie jest przeznaczona dla prawego oka, ta po prawej — dla lewego oka, więc linie twojego wzroku będą się przecinać. To może wydawać się trudne, ale w rzeczywistości jest bardzo łatwe do zrealizowania. Trzymaj otwartą książkę jedną ręką w odległości około 15 cali (38 cm) z rysunkiem na wprost swoich oczu. Wskazujący palec drugiej ręki umieść mniej więcej w połowie odległości od oczu do książki. Patrz na ilustrację 4.2. Powinieneś widzieć ostry obraz rysunku oraz dwa rozmyte obrazy swojego palca (jeden obraz widziany przez lewe oko i jeden przez prawe). Cały czas skupiając wzrok na stronie, poruszaj palcem tam i z powrotem, aż jeden z dwóch rozmytych obrazów palca znajdzie się na środku dolnej krawędzi lewej fotografii, a drugi rozmyty obraz palca znajdzie się na środku dolnej krawędzi prawej. Oprócz ruchów palcem możesz także lekko przechylać głowę w lewo lub w prawo. A teraz skup wzrok na palcu. Powinieneś widzieć jeden ostry obraz palca oraz trzy rozmyte obrazy fotografii z książki. Ostrożnie, nie poruszając gałkami oczu — aby

utrzymać skrzyżowane linie wzroku — przenieś uwagę na środkowy obraz. Powinien się zogniskować jako piękny trójwymiarowy obraz nieba z jasną gwiazdą Wega wyskakującą z książki na tle innych gwiazd. Powinieneś widzieć, że różne gwiazdy znajdują się w różnych odległościach od ciebie. Twój mózg automatycznie mierzy „przesunięcia" i wykonuje obliczenia paralaksy. W taki sposób działa nasze trójwymiarowe widzenie. Mózg nieustannie porównuje obrazy z obu oczu i wykonuje obliczenia paralaksy, aby wyznaczyć odległość obiektów, które znajdują się w polu widzenia. Alternatywna metoda polega na tym, aby zacząć od palca. Patrz na palec — twoje oczy skrzyżują się na palcu, a za nim pojawią się trzy rozmyte obrazy. Przenieś uwagę na środkowy obraz. Powinieneś zobaczyć trójwymiarowy obraz. Jeżeli nie uda się za pierwszym razem, próbuj dalej. Nie zawsze się udaje, ale jeżeli ci się uda, to zobaczysz spektakularny efekt wart wysiłku. Zastosujemy tę samą technikę w dalszej części książki, oglądając ilustrację 18.1.

Wyświetlamy te dwa zdjęcia naprzemiennie, jedno po drugim. Jeżeli zdjęcia są identyczne, z wyjątkiem jednej gwiazdy, która przeskakuje z miejsca na miejsce, to ta gwiazda jest blisko nas, a wszystkie pozostałe są daleko. Im jest bliżej nas, tym większe jest jej „przesunięcie". Piszę „przesunięcie" w cudzysłowie, ponieważ to nie ona się przesuwa. Gwiazda leży tam, gdzie leży — to my przesuwamy się tam i z powrotem wokół Słońca; przesunięcie gwiazdy jest w istocie skutkiem zmiany naszej perspektywy.

Łatwo się przekonać samemu. Zamknij lewe oko i wyciągnij kciuk na długość wyciągniętej ręki. Ustaw kciuk w jednej linii z jakimś odległym obiektem, patrząc tylko prawym okiem. A teraz mrugnij — zamknij prawe oko i otwórz lewe. Co się stało? Kciuk się przesunął. A teraz umieść kciuk w połowie długości wyciągniętej ręki i powtórz ten eksperyment. Kciuk przesunął się jeszcze bardziej. Astronomowie uświadomili sobie, że taki sam efekt działa dla gwiazd: pobliska gwiazda jest kciukiem, a średnica orbity Ziemi jest odległością twoich oczu. Nie da się oczywiście zmierzyć odległości do jakiejś gwiazdy, korzystając z paralaksy własnych oczu, ponieważ kilka centymetrów, które dzielą gałki oczu, to za mało, aby dało się odróżnić kąty widzenia gwiazdy. Lecz średnica orbity Ziemi wynosi 300 milionów kilometrów. Ta odległość okazała się wystarczająca, aby „mrugnąć" na Wszechświat i zmierzyć odległości do kilku pobliskich gwiazd.

Na ilustracji 4.2 mamy symulację takiego pomiaru na tle konstelacji Liry. Gwiazdy na dwóch obrazkach zostały przesunięte proporcjonalnie do ich obserwowanej paralaksy, tak jakby reprezentowały dwie fotografie wykonane w odstępie sześciu miesięcy na orbicie Ziemi. Przesunięcia zostały sztucznie powiększone, aby efekt paralaksy był dobrze widoczny.

Wega, najjaśniejsza gwiazda na ilustracji, jest oddalona od nas tylko o 25 lat świetlnych, znacznie bliżej niż inne gwiazdy w konstelacji Liry. Jeżeli porównasz oba obrazki i poszukasz różnic, przekonasz się, że przesunięcie Wegi jest największe.



ILUSTRACJA 4.2. Paralaksa Wegi. Dwie schematyczne ilustracje symulujące zdjęcia konstelacji Liry, wykonane w odstępie sześciu miesięcy na orbicie Ziemi. Każda gwiazda na zdjęciach jest odpowiednio przesunięta, a przesunięcie jest odwrotnie proporcjonalne do odległości od Ziemi. Wszystkie przesunięcia są powiększone o duży czynnik, aby były widoczne na ilustracji. Wega (najjaśniejsza gwiazda w konstelacji Liry) jest oddalona od nas tylko o 25 lat świetlnych. Paralaktyczne przesunięcie Wegi łatwo zobaczyć, porównując jej położenie na obu ilustracjach. Kierując się instrukcją zamieszczoną na s. 61, możesz także użyć tych ilustracji jako stereoskopowej pary ze skrzyżowanymi liniami wzroku, co pozwoli zobaczyć trójwymiarowy obraz

Photo credit: Robert J. Vanderbei, J. Richard Gott

Im większa odległość, tym mniejsze przesunięcie paralaktyczne, ale można tą techniką zmierzyć odległości wielu pobliskich gwiazd. Zacznijmy od kilku podstawowych faktów z geometrii. Na ilustracji 4.1 widzimy pobliską gwiazdę na tle układu odległych gwiazd. W styczniu gwiazda znajduje się w jednym położeniu, w lipcu w innym. Połowa tego przesunięcia definiuje tak zwany kąt paralaksy, czyli kąt, o jaki gwiazda przemieściłaby się na niebie, gdyby ziemski obserwator przemieścił się nie o 2 AU, lecz o 1 AU. Wiemy, ile wynosi promień ziemskiej orbity (1 AU) w kilometrach. Możemy zmierzyć kąt paralaksy. Rozważmy teraz trójkąt, który tworzą Ziemia, Słońce i gwiazda. Jest to trójkąt prostokątny z kątem prostym przy Słońcu. Zmiana kąta, pod jakim widzimy gwiazdę w ciągu roku, jest dokładnie równa zmianie kąta, pod jakim obserwator znajdujący się na tej gwieździe widzi nas, patrząc wzdłuż tych samych dwóch linii obserwacji. Oznacza to, że kąt paralaksy, który my obserwujemy z Ziemi, jest równy kątowi między Słońcem i Ziemią (w lipcu), który widzi obserwator znajdujący się na tej gwieździe (zobacz ponownie il. 4.1). Oznacza to, że trójkąt Ziemia–Słońce–gwiazda ma następujące trzy kąty: kąt 90° (z wierzchołkiem przy Słońcu), kąt paralaksy (wierzchołek przy gwieździe) oraz kąt równy 90° minus kąt paralaksy (wierzchołek przy Ziemi), ponieważ suma kątów w trójkącie musi być równa 180°, zgodnie z regułami geometrii euklidesowej.

Znamy długość jednego boku tego trójkąta — jest równy odległości Ziemia –Słońce. Znając także miary wszystkich kątów trójkąta, możemy obliczyć długość każdego z pozostałych boków, w szczególności tego boku, który łączy Słońce oraz gwiazdę. W ten sposób — mierząc paralaksę — możemy wyznaczyć odległość do gwiazdy. Wprowadzimy teraz nową jednostkę odległości zwaną parsekiem. Gwiazda jest odległa o parsek, jeżeli jej paralaksa jest równa jednej sekundzie kątowej. Jedna sekunda kątowa jest oczywiście równa 1/60 minuty kątowej, a jedna minuta kątowa jest równa 1/60 stopnia,

czyli jedna sekunda kątowa jest równa 1/3600 stopnia. Policzymy teraz, w jakiej odległości znajduje się gwiazda, jeżeli jej paralaksa jest równa jednej sekundzie kątowej. Jedna sekunda kątowa łuku odpowiada 1/(360 × 60 × 60) całego obwodu okręgu. Narysujmy teraz ogromny okrąg, którego środkiem jest Słońce, a gwiazda leży na obwodzie. Jeżeli gwiazda jest w odległości d od nas, obwód tego okręgu $C = 2\pi d$. Odcinek równy odległości Ziemia–Słońce, $r = 1$ AU, wycina na tym okręgu maleńki fragment łuku, równy 1/(360 × 60 × 60) całego obwodu. Mamy zatem $1 \text{ AU}/2\pi d = 1/(360 \times 60 \times 60)$, co daje $d = 206\,265$ AU, odległość odpowiadającą paralaksie równej jednej sekundzie kątowej. Prosta geometria euklidesowa.

Jeżeli oglądasz serial *Star Trek,* słyszysz często słowo „parsek". To fajna i dźwięczna nazwa. Ile to jest lat świetlnych? To 3,26 roku świetlnego. W tej książce będziemy głównie posługiwać się latami świetlnymi, ale jeżeli kiedyś zetkniesz się z określeniem parsek, to będziesz wiedział, co to jest. Przy okazji możemy także wyjaśnić, skąd ono pochodzi. Astronomowie utworzyli to słowo, łącząc dwa inne określenia: „paralaksa" oraz „sekunda". Gwiazda, której paralaksa wynosi 1/2 sekundy kątowej, jest odległa o 2 parseki. Gwiazda, której paralaksa wynosi 1/10 sekundy kątowej, jest odległa o 10 parseków. Łatwe. Mamy w astronomii wiele takich określeń. Niektóre z nich są dość popularne, na przykład kwazar lub pulsar. Słowo „kwazar" pochodzi od określenia „*quas*i-stell*ar* radio source" (quasi-gwiezdne źródło radiowe). Pulsar pochodzi od „*puls*ating st*ar*" (pulsująca gwiazda) — wszystkim się podoba. Istnieje nawet marka zegarków Pulsar.

Która gwiazda leży najbliżej Ziemi? Jeżeli odpowiesz, że Alfa Centauri, to dałeś się podpuścić. Najbliżej Ziemi jest Słońce. Najbliżej Słońca leży układ Alfa Centauri. „Alfa" oznacza, że jest to najjaśniejsza gwiazda swojej konstelacji: widocznej na południowej półkuli konstelacji Centaura. W rzeczywistości jest to układ trzech gwiazd. Jedna z nich jest najbliższą sąsiadką Słońca. W skład układu potrójnego Alfa Centauri wchodzi Alfa Centauri A, gwiazda tej samej kategorii co nasze Słońce, o średnicy równej 123% średnicy Słońca; Alfa Centauri B, 86,5% średnicy Słońca; Proxima Centauri A, czerwony karzeł o średnicy równej zaledwie 14% średnicy Słońca. Spośród tych trzech gwiazd Proxima leży najbliżej Słońca[8], w odległości około 4,1 roku świetlnego, co daje paralaksę 0,8 sekundy kątowej.

Sekunda kątowa to bardzo, bardzo mały kąt. Na zdjęciach nocnego nieba, wykonanych z Ziemi profesjonalnym teleskopem, pozorne rozmiary gwiazd wynoszą zazwyczaj około jednej sekundy kątowej. To typowe dla ziemskich teleskopów. Kosmiczny Teleskop Hubble'a jest dziesięć razy lepszy. Atmosfera rozmywa obrazy gwiazd wykonywane teleskopami umieszczonymi na Ziemi. Światło gwiazdy biegnie w próżni jako ostry, wąski promień, lecz gdy wejdzie w atmosferę, jest potrącane, szarpane, rozpraszane, i w końcu ląduje w soczewce oka lub teleskopu jako wielka plama. Patrzymy w niebo i mówimy: „Och, czyż to nie piękne? Gwiazdy mrugają!". Ale dla astronoma mruganie gwiazd nie jest piękne, lecz paskudne. Jedna sekunda kątowa to typowa szerokość tego mrugania.

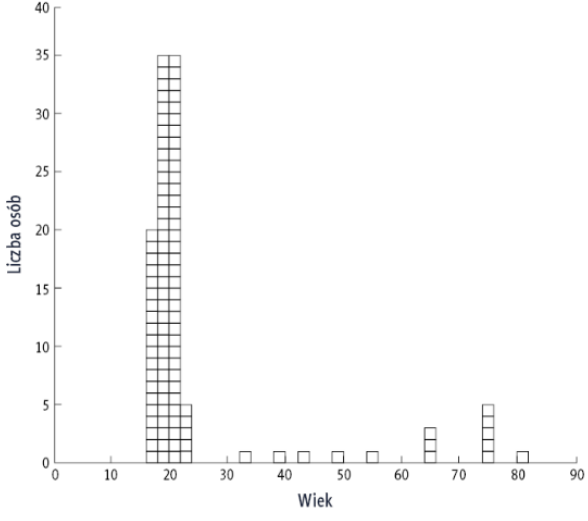
Zwróć uwagę, że jeden parsek to mniej niż odległość do najbliższej gwiazdy. Z tego powodu minęły tysiące lat, zanim astronomowie zdołali zmierzyć paralaksę. Dopiero w 1838 roku niemiecki matematyk, Friedrich Bessel, zdołał zmierzyć pierwszą gwiezdną paralaksę (jeżeli atmosfera rozmywa obraz do szerokości jednej sekundy kątowej, to astronom obserwujący gwiazdę przez teleskop musi wykonać wiele pomiarów, aby uzyskać dokładność poniżej jednej sekundy kątowej). W istocie, argumenty, które ponad dwa tysiące lat temu wysunął Arystarch, dowodząc, że Ziemia krąży po orbicie wokół Słońca, zostały odrzucone przez brak obserwowanej paralaksy. Grecy to byli sprytni goście. „Dobrze — stwierdzili — nie podoba ci się nasz heliocentryczny wszechświat ze Słońcem krążącym wokół Ziemi? Wolałbyś, aby Ziemia krążyła wokół Słońca?" Wiedzieli, że gdyby Ziemia rzeczywiście krążyła wokół Słońca, pobliskie gwiazdy byłyby widoczne pod pewnym kątem, gdy Ziemia jest z jednej strony Słońca, a pod innym kątem, gdy Ziemia jest po drugiej stronie Słońca. Grecy wiedzieli, że powinni obserwować efekt paralaksy. Teleskopów jeszcze nie było, więc próbowali zaobserwować paralaksę gołym okiem, ale efekt paralaksy jest zbyt mały, aby był mierzalny bez teleskopu. W rezultacie brak widocznej paralaksy został użyty jako potężny argument przeciwko koncepcji układu heliocentrycznego ze Słońcem w centrum Wszechświata.

Obserwując na nocnym niebie wszystkie te mrugające gwiazdy i rozmyte mgławice, nie mieliśmy pojęcia o rozmiarach Wszechświata aż do początków XX wieku. Dopiero wtedy przepuściliśmy światło gwiazd przez pryzmat i uzyskaliśmy pewne dane, które można poddać analizie. Wtedy przekonaliśmy się, że niektóre gwiazdy można potraktować jako „świece standardowe". Spróbujmy to wyjaśnić. Gdyby wszystkie gwiazdy na nocnym niebie były dokładnie takie same — gdyby zostały równo ucięte jakimś kuchennym nożem i rozrzucone we Wszechświecie — słabsze byłyby zawsze dalej, a jaśniejsze bliżej. Wtedy sprawa byłaby prosta. Wszystkie jasne gwiazdy byłyby blisko. Wszystkie słabe gwiazdy byłyby daleko. Ale w rzeczywistości tak nie jest. W tym gwiezdnym zoo musimy zatem poszukać gwiazd tego samego rodzaju. Jeżeli widmo jakiejś grupy gwiazd ma pewną szczególną cechę, a jedna z nich jest na tyle blisko, że możemy zmierzyć jej paralaksę, to możemy skalibrować moc tej gwiazdy i użyć jej do wyznaczenia odległości innych gwiazd. Widząc, że jasność innej gwiazdy jest cztery razy mniejsza albo dziewięć razy mniejsza, możemy obliczyć ich odległości. Ale potrzebujemy tę jedną świecę standardową jako miarkę. Dopiero w latach dwudziestych XX wieku znaleźliśmy takie miarki. Wcześniej nie mieliśmy pojęcia o odległościach we Wszechświecie. Książki z tego okresu opisują Wszechświat po prostu jako strefę gwiazd, bez wzmianki o zasięgu lub rozmiarach Wszechświata.

Potrzebujemy teraz nieco informacji na temat pewnych matematycznych narzędzi, zwanych funkcjami rozkładu (ang. *distribution function*). Jest to bardzo użyteczne pojęcie o wielu zastosowaniach w matematyce i w innych naukach. Zacznijmy od bardzo prostej wersji funkcji rozkładu, zwanej histogramem, który mógłby się pojawić na przykład na stronach „USA Today", ponieważ oni lubią się posługiwać histogramami i wykresami. Możemy

narysować wykres ilustrujący liczbę słuchaczy w przeciętnej klasie w amerykańskim koledżu jako funkcję wieku (il. 4.3).

Aby sporządzić taki histogram, trzeba zacząć od pytania, kto ma 16 lat lub mniej. Jeżeli nikt się nie zgłosi, histogram będzie miał wartość zero dla tego zakresu lat. Następnie pytamy, ile osób ma 17-18 lat. Powiedzmy, że 20 osób. Dla siedemnasto-, osiemnastolatków rysujemy słupek wysoki na 20 jednostek. A 19-20 lat? Tyle ma 35 osób. Kontynuujemy pytania, aż sprawdzimy wiek wszystkich obecnych.



ILUSTRACJA 4.3. Histogram wieku w klasie

Credit: J. Richard Gott

Popatrzmy teraz na ilustrację 4.3 i spróbujmy przeanalizować, co ten wykres mówi o ludziach należących do tej klasy. Po pierwsze, większość należy do grupy wiekowej 17-20, co sugeruje, że mamy do czynienia z grupą studentów. Następnie mamy przerwę, potem kilku maruderów i kolejne dwa słupki w okolicy 70 lat. Dwa słupki (w żargonie: dwa mody) — mówimy, że mamy do czynienia z rozkładem dwumodalnym. Większość osób w tej starszej grupie to nie są studenci; prawdopodobnie są to wizytatorzy, a ktoś, kto wizytuje dzienne zajęcia w koledżu, najprawdopodobniej jest już emerytem, skoro nie musi pracować na swoje utrzymanie od godziny 8 do 16. Sporo wniosków można wyciągnąć, analizując ten rozkład. Gdybyśmy przeprowadzili takie badanie na całej populacji koledżu, prawdopodobnie zapełnilibyśmy kilka pustych miejsc, ale mogę się założyć, że wykres byłby bardzo podobny: w większości studenci, kilka starszych osób i od czasu do czasu przedwcześnie dojrzały czternastolatek — może jeden na tysiąc — w każdym roczniku trafia się jeden młody geniusz. Na osi poziomej przyjęliśmy dwuletnie przedziały wiekowe. Mając dużą liczbę danych, mógłbym sporządzić podobny histogram, ale z mniejszym podziałem na osi poziomej. Gdybym miał dostęp do większej próbki, na przykład do wszystkich studentów w całym kraju, mógłbym zmniejszyć przedział wiekowy do jednego dnia. Mój wykres nie byłby wtedy tak poszatkowany. Słupki byłyby tak wąskie, że mógłbym narysować na nich gładki wykres. Jeżeli przechodzisz od wykresu słupkowego do gładkiej krzywej, którą możesz zapisać w jakiejś matematycznej formie, twój histogram staje się funkcją rozkładu.

Ile osób należy do grupy, dla której sporządziliśmy ilustrację 4.3? To łatwe — wystarczy przejść wzdłuż osi i dodać wszystkie liczby. W tym przypadku dostajemy 109. Jeżeli masz do czynienia z funkcją rozkładu, możesz użyć rachunku całkowego, aby obliczyć pole powierzchni pod krzywą. Pole reprezentuje liczbę obiektów poddanych analizie. Newton wynalazł rachunek różniczkowy i całkowy, mając dwadzieścia sześć lat — moim zdaniem był on najbystrzejszym człowiekiem, jaki kiedykolwiek stąpał po Ziemi!

W jaki sposób można powyższe rozważania zastosować do gwiazd? Spójrzmy na Słońce. Chciałbym rzec: „Słońce, zdradź mi coś. Chcę wiedzieć, ile cząstek światła emitujesz". Isaac Newton sformułował także koncepcję cząstek światła (na długo przed Einsteinem, mógłbym dodać). Mamy obecnie odpowiednie określenie dla tych cząstek: fotony. Nie protony, lecz fotony. „Foto-", tak jak „fotografia", albo „torpeda fotonowa". Miłośnicy *Star Treka* znają te określenia.

Fotony mają rozmaite kolory. Isaac Newton przepuścił białe światło przez pryzmat, a następnie wyliczył kolory, które zobaczył w tęczy za pryzmatem: czerwony, pomarańczowy, żółty, zielony, niebieski, indygo (często spotykany barwnik w czasach Newtona), fioletowy. Obecnie zazwyczaj wymieniamy sześć kolorów tęczy, ale — w hołdzie dla Newtona — ja zwykle dodaję indygo; poza tym, rozmaite mnemotechniczne sposoby zapamiętywania kolorów tęczy, takie jak „Roy G Biv", na ogół obejmują siedem kolorów.

Angielski astronom, William Herschel, odkrył zakres widma, zwany dzisiaj promieniowaniem podczerwonym, którego nasze oczy nie rejestrują. Na skali energii promieniowanie podczerwone leży „poniżej" czerwonego. Herschel przepuścił światło słoneczne przez pryzmat i zauważył, że termometr umieszczony poza czerwonym końcem widma był gorący. Po drugiej stronie można także wyjść poza skalę widzialnego widma, w obszar zwany ultrafioletem, w skrócie UV. Z pewnością słyszałeś o obu tych zakresach światła, ponieważ pojawiają się często w codziennym życiu. Promieniowanie UV jest źródłem opalenizny; podczerwone podgrzewacze w restauracji utrzymują frytki w odpowiedniej temperaturze, zanim trafią na twój talerz.

Widmo jest znacznie bogatsze niż to, co widzą nasze oczy. Za ultrafioletem mamy promienie X, a jeszcze dalej promieniowanie gamma. Słyszałeś o nich. Idźmy teraz w przeciwną stronę. Poza zakresem promieniowania podczerwonego są mikrofale. Potem fale radiowe. Mikrofale były kiedyś uważane za część zakresu fal radiowych, ale teraz są traktowane jako oddzielny zakres widma. Nie wyróżniamy, nie mamy nazwy dla fal powyżej zakresu gamma — wszystko, co jest powyżej, nazywa się gamma. Podobnie na drugim końcu widma nie mamy nazwy poniżej zakresu radiowego[9].

Foton jest cząstką. Możemy także uważać foton za falę, zgodnie z dualną naturą cząstek. Czym zatem jest foton? Falą czy cząstką? To pytanie jest źle sformułowane. Powinniśmy raczej zadawać sobie pytanie, dlaczego nasz mózg nie jest w stanie zgłębić czegoś, co ma w sobie dualną naturę. Tu jest problem. Możemy tworzyć nowe słowa, takie jak „falocząstka". To określenie powstało jakiś czas temu, ale nigdy się nie przyjęło, ponieważ ludzie nadal chcą wiedzieć, czym są cząstki. A odpowiedź zależy od tego, co i jak chcesz

zmierzyć. Jeżeli myślimy o fotonie jako o fali, to fale charakteryzuje wielkość zwana długością fali. Do oznaczenia tej wielkości używamy greckiej litery lambda, λ.

Jak duże są fale radiowe? Pomyśl o tym w następujący sposób: niegdyś, gdy ktoś chciał zmienić kanał TV, musiał wstać z kanapy, podejść do telewizora i pokręcić przełącznikiem. To było tak dawno, że niektórzy już tego nie pamiętają. Na telewizorze stała antena zwana „królicze uszy" — dwa pręty w kształcie litery V. Jeżeli obraz lub dźwięk nie był wyraźny, widzowie próbowali poruszać prętami anteny. Te anteny były długie na prawie metr, ponieważ fale radiowe przenoszące sygnał telewizyjny mają długość około metra. Antena rejestrowała fale radiowe rozchodzące się w powietrzu. W studiach telewizyjnych do dzisiaj można spotkać napis, który brzmi: „On the Air" („w eterze"; dosł. „w powietrzu"), w nawiązaniu do faktu, że obraz z kamery w studio był transmitowany do domowych odbiorników za pomocą fal rozchodzących się w powietrzu. Dzisiaj większość transmisji odbywa się poprzez fale rozchodzące się wzdłuż kabli, lecz napis w studio nie brzmi „On the Cable". Co więcej, promieniowanie elektromagnetyczne (i światło, i fale radiowe) rozchodzi się bez problemu w próżni. Obecność powietrza jest praktycznie bez znaczenia, co zawsze prowokowało mnie, aby zamienić napis „On the Air" na „On the Space" („W przestrzeni").

A co z telefonami komórkowymi? Jak duże są ich anteny? Całkiem małe. Komórki wykorzystują mikrofale — fale o długości zaledwie kilku lub kilkunastu centymetrów. Dzisiejsze telefony mają anteny mieszczące się wewnątrz obudowy, ale niektóre wcześniejsze modele miały krótką, grubawą antenę, którą wysuwało się przed każdą rozmową.

Jak duże są otwory w ekranie kuchenki mikrofalowej? Drzwiczki kuchenki mają otwory, przez które widzisz wstawioną do środka potrawę. Zwróć uwagę, że te otwory mają tylko kilka milimetrów, mniej niż długość fali mikrofal, które podgrzewają twój posiłek. Dwunastocentymetrowa mikrofala, która chciałaby się wydostać na zewnątrz, widzi kilkumilimetrowy otwór, przez który nie zdoła się przedostać. Nigdzie nie jest w stanie znaleźć wyjścia na zewnątrz. Czy wiesz, kto jeszcze wykorzystuje mikrofale? Policjant, który celuje swoim radarem w samochody, mierząc ich prędkość. Mikrofale odbijają się od metalowej karoserii. Istnieje sprytny sposób, aby tego uniknąć: kojarzysz czarne osłony przeciwko owadom, które kierowcy, zazwyczaj młodzieńcy w sportowych samochodach, umieszczają przed przednim błotnikiem? One bardzo dobrze pochłaniają mikrofale, gdy więc wiązka mikrofal trafia w taki samochód, odbita od osłony fala jest na tyle słaba, że wiązka, która powraca do policyjnego radaru, nie wystarcza, aby detektor był w stanie wykonać odczyt. Szyby samochodu są oczywiście przezroczyste dla mikrofal. Skąd wiemy, że mikrofale przenikają przez szkło? A gdzie kierowcy umieszczają swoje detektory radarów? Zazwyczaj wewnątrz samochodu nad deską rozdzielczą, więc oczywiście mikrofale przenikają przez szkło. Na tej samej zasadzie możesz mikrofalować potrawy w szklanym naczyniu, ponieważ mikrofale bez przeszkód przenikają przez ścianki naczynia. Aby zmierzyć twoją prędkość, policyjny radar wykorzystuje zjawisko zwane

efektem Dopplera, które omówimy nieco później. Obecnie musisz jedynie wiedzieć, że polega ono na zmianie długości fali ulegającej odbiciu od poruszającego się ciała. Dokładny pomiar wymaga, aby detektor znajdował się dokładnie na drodze poruszającego się samochodu, czyli policjant musiałby stać na środku drogi. W normalnych warunkach policyjny radar znajduje się zazwyczaj nieco z boku, na skutek czego daje, niestety, zaniżony odczyt. Rzeczywista prędkość jest nieco większa, więc gdy cię namierzą, nie masz wyjścia. Płacisz mandat i jedziesz dalej.

Policyjny radar wysyła sygnał, który odbija się od twojego samochodu. Wyobraź sobie teraz, że patrzysz na swoje odbicie w lustrze. Lustro jest oddalone o 10 stóp i porusza się w twoim kierunku z prędkością jednej stopy na sekundę. Twój odbity obraz startuje w odległości 20 stóp (światło leci 10 stóp w kierunku lustra oraz 10 stóp z powrotem). Ale jedną sekundę później lustro jest już tylko 9 stóp od ciebie, więc widzisz swoje odbicie w odległości 18 stóp. Czyli lustro porusza się w twoim kierunku z prędkością jednej stopy na sekundę, ale twój obraz w tym lustrze porusza się w twoim kierunku z prędkością dwóch stóp na sekundę. Na tej samej zasadzie policyjny radar rejestruje odbicie twojego samochodu zbliżające się do policjanta z prędkością dwukrotnie większą niż prędkość twojego samochodu. Spróbuj wyjaśnić tę kwestię sędziemu! Policyjne radary są oczywiście wykalibrowane tak, że wyświetlają połowę zmierzonego przesunięcia Dopplera, aby poprawnie rejestrować prędkość lustra, czyli twojego samochodu. Przy okazji, słowo „radar" jest akronimem od: *radio detection and ranging* (radiowa detekcja oraz namierzanie), gdyż pochodzi z czasów, gdy mikrofale były uważane za część zakresu fal radiowych.

A skoro już mowa o mikrofalach — molekuła wody, H_2O, silnie absorbuje mikrofale. Kropla wody w twojej kuchence mikrofalowej zawiera miliardy bilionów molekuł wody i wszystkie one absorbują mikrofale. Woda się nagrzewa na skutek tarcia między molekułami, które nieustannie obracają się z częstotliwością promieniowania mikrofalowego. Jeżeli wstawisz do kuchenki cokolwiek, co zawiera wodę, mikrofale będą pochłaniane i temperatura będzie wzrastać. Nie licząc soli, wszystko, co jemy, zawiera wodę, dlatego kuchenki mikrofalowe tak skutecznie podgrzewają nasze posiłki, a nie podgrzewają szklanego talerza, jeżeli nie ma na nim wody.

Ludzkie ciało reaguje na promieniowanie podczerwone. Nasza skóra je absorbuje, a my odczuwamy to jako ciepło. Światło widzialne dobrze znamy. Zależnie od odcienia lub koloru twojej skóry jesteś mniej lub bardziej narażony na skutki promieniowania nadfioletowego. Może ono uszkadzać głębsze warstwy skóry, co w skrajnych przypadkach prowadzi do powstania nowotworów skóry. Ozon w atmosferze chroni nas przed promieniowaniem ultrafioletowym Słońca. Tlen występuje w atmosferze w postaci molekuł O_2 oraz O_3 (złożonych odpowiednio z dwóch lub trzech atomów tlenu). Ozon występuje w górnej warstwie atmosfery, gdzie absorbuje większość fotonów promieniowania ultrafioletowego Słońca. Gdyby w atmosferze Ziemi nie było ozonu, ultrafiolet docierałby do powierzchni planety, zwiększając znacznie częstotliwość nowotworów skóry. Atmosfera Marsa nie zawiera ozonu,

dlatego powierzchnia Marsa jest nieustannie skąpana w świetle promieniowania ultrafioletowego Słońca. Stąd sądzimy, że na powierzchni Marsa nie istnieje życie, nawet jeżeli może istnieć pod powierzchnią. Jakakolwiek materia ożywiona wystawiona na taką dawkę promieniowania ultrafioletowego dawno uległaby rozkładowi.

Niemal każdy z nas był kiedyś prześwietlany. Czy pamiętasz, co mówił i co robił technik w pracowni rentgenowskiej, zanim włączył aparaturę? Kazał ci się położyć, powiedział „proszę się nie ruszać", wyszedł do sąsiedniego pomieszczenia, za jakąś ołowianą zasłonę, zamknął drzwi i dopiero wtedy włączył aparaturę. W ten sposób uniknął niepożądanej dawki promieniowania. Powinno ci to dać do myślenia — za chwilę stanie się coś niedobrego dla twojego organizmu. Promienie X przenikają przez skórę i docierają głęboko do wnętrza organizmu. Mogą zainicjować wzrost tkanki nowotworowej wewnętrznych organów. Z drugiej strony niepoddanie się prześwietleniu może mieć jeszcze gorsze konsekwencje. Jeżeli złamałeś rękę, diagnoza zwykle wymaga wykonania zdjęcia rentgenowskiego. Jeżeli dawka promieni X jest mała, ryzyko jest niewielkie.

Promienie gamma są jeszcze groźniejsze. Docierają do twojego DNA i mogą nieźle w nim namieszać. Nawet bohaterowie komiksów wiedzą, że promienie gamma są groźne. Pamiętasz film *Niesamowity Hulk*? Jak powstał Hulk? Co się z nim stało? Czy aby nie wykonywał eksperymentów, które wystawiły go na wysoką dawkę promieni gamma? A teraz, gdy jest zły, staje się duży, brzydki i zielony. A więc bądź ostrożny z promieniami gamma, jeśli nie chcesz, aby to samo przydarzyło się tobie. Przechodząc wzdłuż widma do coraz mniejszych długości fali, od UV, przez promienie X, aż po promienie gamma, energia pojedynczego fotonu jest coraz większa, a wraz z energią rośnie jego zdolność do powodowania zniszczeń.

Promienie radiowe są obecnie wszędzie wokół nas. Przez cały czas. Możesz wykonać bardzo prosty eksperyment, aby to stwierdzić. Włącz radio i ustaw je na jakąś stację. Jakąkolwiek stację, o dowolnej porze dnia. Stacje radiowe nieustannie emitują fale radiowe, które nieustannie docierają do twojego radia. Promienie mikrofalowe są także obecne wszędzie wokół nas. Skąd to wiemy? Twój telefon komórkowy dzwoni za każdym razem, gdy ktoś chce z tobą porozmawiać. Stacje przekaźnikowe telefonii komórkowej nieustannie emitują promienie mikrofalowe, które nieustannie docierają do twojego telefonu. Ale mikrofale są niegroźne w porównaniu z tym, co się dzieje na wysokoenergetycznym końcu widma. Chyba że zmieścisz się wewnątrz kuchenki mikrofalowej.

Wszystkie te fotony podróżują w próżni z jednakową prędkością. Z prędkością światła. To nie jest jedynie dobry pomysł — to jest prawo przyrody. Światło widzialne, tak jak je zdefiniowaliśmy, znajduje się na środku widma elektromagnetycznego, ale to wszystko jest światłem i wszystko porusza się z prędkością światła, 300 000 kilometrów na sekundę (ściśle rzecz biorąc, 299 792 458 metrów na sekundę). Jest to jedna z najważniejszych stałych przyrody.

Wszystkie fotony poruszają się z taką samą prędkością, ale mogą się różnić długością fali. Gdy przebiegają obok mnie, ich częstotliwość jest zdefiniowana jako liczba grzbietów fali, które mijają mnie w ciągu jednej sekundy. W przypadku małej długości fali liczba grzbietów na sekundę będzie duża; dla dużej długości fali liczba grzbietów na sekundę będzie mała. Wysoka częstotliwość odpowiada zatem małej długości fali, niska częstotliwość odpowiada dużej długości fali. Tę zależność doskonale odzwierciedla prosty i znany wzór: prędkość światła (c) jest równa częstotliwości pomnożonej przez długość fali (λ). Dla częstotliwości używamy greckiej litery ν. Wzór wygląda następująco:

$$c = \nu \lambda.$$

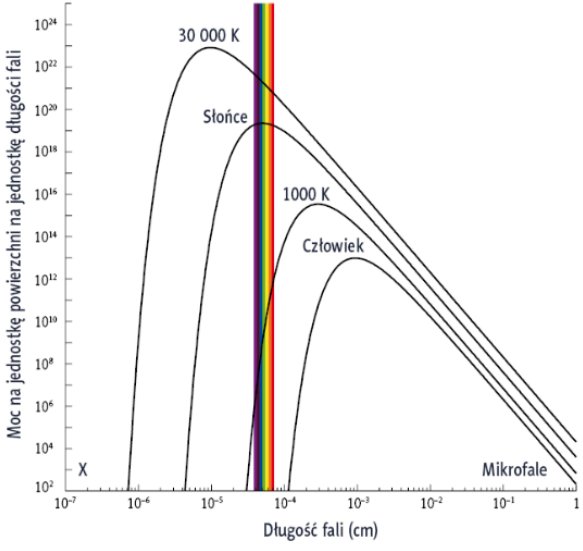
Rozważmy jako przykład fale radiowe o długości 1 metra. Prędkość światła jest w przybliżeniu równa 300 000 000 metrów na sekundę, zatem długość fali $\lambda = 1$ metr trzeba pomnożyć przez częstotliwość równą 300 000 000 grzbietów (cykli) na sekundę, czyli 300 megacykli (300 MHz).

Częstotliwość jest także związana z energią fotonu. Energia jednego fotonu:

$$E = h\nu.$$

Ten wzór odkrył Einstein. Występuje w nim stała Plancka, h, nazwana na cześć niemieckiego fizyka, Maxa Plancka. Stała h w powyższym wzorze służy jako współczynnik proporcjonalności, który mówi, że energia i częstotliwość są proporcjonalne — im wyższa częstotliwość, tym większa energia pojedynczego fotonu. Jeden foton promieniowania X niesie znaczną porcję energii, natomiast foton promieniowania radiowego — wielokrotnie mniejszą.

Pora zapytać Słońce, ile fotonów emituje i na jakich częstotliwościach. Ile zielonych fotonów wychodzi z powierzchni Słońca, ile czerwonych, ile podczerwonych, ile mikrofal, ile radiowych, ile fotonów gamma? Słońce emituje tak dużo fotonów, że możemy to zilustrować znacznie lepiej niż wykresem słupkowym, ponieważ dysponujemy ogromną liczbą danych. Możemy narysować gładką krzywą — wykres natężenia w funkcji długości fali. Na osi pionowej będziemy mieli liczbę fotonów na sekundę emitowanych przez metr kwadratowy powierzchni Słońca, na jednostkę długości fali pomnożoną przez energię jednego fotonu — dla określonej długości fali. Równie dobrze moglibyśmy liczyć same fotony, ale zazwyczaj jesteśmy zainteresowani ilością energii, którą niosą fotony. W rezultacie na osi pionowej mamy moc (energię w jednostce czasu) emitowaną przez jednostkę powierzchni Słońca na jednostkę długości fali[10]. Na poziomej osi mamy długość fali, rosnącą w prawo. Nanosimy na wykres promienie X, UV, widzialne (pas w kolorach tęczy), podczerwone (IR — *infrared*), mikrofale (oznaczone jako mikrofale). Na ilustracji 4.4 mamy funkcję rozkładu natężenia promieniowania Słońca.



ILUSTRACJA 4.4. Promieniowanie Słońca i człowieka. Na osi pionowej odwzorowana jest energia na jednostkę czasu (czyli moc) emitowana przez różne źródła na jednostkę długości fali na jednostkę powierzchni. Pozioma oś reprezentuje długość fali. Cztery krzywe reprezentują gwiazdę o temperaturze 30 000 K, Słońce (5800 K), brązowego karła o temperaturze 1000 K oraz człowieka (310 K)

Photo credit: Michael A. Strauss

Temperatura powierzchni Słońca będącej źródłem tego promieniowania wynosi około 5800 K. Funkcję rozkładu odkrył Max Planck. Maksimum funkcji przypada w widzialnej części widma, co nie jest dziełem przypadku — nasze oczy wyewoluowały tak, aby rejestrować maksymalną ilość światła. Aby porównać Słońce z innymi gwiazdami, wybierzmy jeden metr kwadratowy powierzchni jako przykładowe źródło. Rozmiar tej powierzchni nie ma znaczenia pod warunkiem, że jest taka sama dla każdego z porównywanych źródeł. Niektórzy mówią, że nasze Słońce jest żółte, lecz to nie jest prawda. Jeżeli chciałbyś stwierdzić, że jest żółte, ponieważ maksimum wypada w okolicy żółtego koloru, można by równie łatwo argumentować, że maksimum wypada w okolicy zielonego, więc mamy zieloną gwiazdę. Oprócz żółtego, należy także uwzględnić odpowiednią ilość fioletu, indygo, niebieskiego, zielonego, pomarańczowego i czerwonego — tyle, ile pokazuje wykres. Dodając je wszystkie, będziemy mieli porównywalne ilości energii dla każdego z tych kolorów. A teraz przypomnijmy sobie Isaaca Newtona. Co to za kolor? Biały. Jeżeli przepuścisz jednakowe ilości kolorów światła widzialnego z powrotem przez pryzmat, wyłoni się białe światło. Newton przeprowadził ten eksperyment. Oznacza to, że Słońce, emitując jednakowe ilości każdego z tych kolorów, daje nam białe światło. Nieważne, jak jest przedstawiane w podręcznikach, nieważne, co mówią ludzie na ulicy, mamy białą gwiazdę — tylko tyle i aż tyle. Przy okazji — gdyby Słońce rzeczywiście było żółte, białe powierzchnie byłyby żółte w świetle słonecznym, śnieg byłby żółty (niezależnie od tego, czy jesteś w pobliżu hydrantu przeciwpożarowego).

Temperatura powierzchni Słońca wynosi około 5800 K. Temperatura w skali Kelvina (K) jest równa temperaturze w skali Celsjusza (C) plus 273. Lód zamarza w temperaturze 0 °C (czyli 273 K). Woda wrze w temperaturze 0 °C (373 K). Skale Celsjusza i Kelvina różnią się tylko o 273. Gdy mamy do

czynienia z coraz wyższymi temperaturami, śledzenie tej różnicy ma coraz mniejsze znaczenie. Tak czy owak, 5800 kelwinów to dużo. Wystarczy, by wyparować każdego, kto się zbliży. No i dla podsumowania — 0 K (zero kelwinów) to najniższa możliwa temperatura (zapewne słyszałeś, że nazywamy ją temperaturą absolutnego zera). Wszelkie ruchy cząstek zamierają w temperaturze 0 K.

Przyjrzyjmy się innym gwiazdom. Na ilustracji 4.4 jedna z krzywych dotyczy gwiazdy, której maksimum wypada zaledwie w 1000 K, czyli w podczerwieni. Czy twoje oczy widzą w podczerwieni? Nie. Czy ta gwiazda jest niewidoczna? Nie. Niewielka część jej promieniowania wypada w widocznej części widma. Natężenie raptownie spada, gdy wykres przechodzi od czerwieni do błękitu przez widzialną część widma — ta gwiazda emituje znacznie więcej koloru czerwonego niż niebieskiego. Ta gwiazda będzie czerwona w naszych oczach. A teraz popatrzmy na gwiazdę, której temperatura wynosi 30 000 K. Dla przypomnienia, zadajemy sobie teraz pytania na temat rozkładów widmowych światła w ścisłej analogii do pytań, które dotyczyły rozkładów wieku studentów w koledżu. Gdzie jest maksimum natężenia dla gwiazdy o temperaturze 30 000 K? W ultrafiolecie. Emituje więcej UV niż w jakimkolwiek innym zakresie. Nie widzimy w ultrafiolecie, ale czy widzimy tę gwiazdę? Tak, oczywiście. Oprócz ultrafioletu także w zakresie widzialnym ta gwiazda emituje mnóstwo energii. W istocie w zakresie widzialnym jeden metr kwadratowy gwiazdy o temperaturze 30 000 K emituje więcej energii niż jeden metr kwadratowy Słońca. Lecz w odróżnieniu od Słońca mieszanka kolorów nie jest jednorodna. Jest więcej niebieskiego, a mniej czerwonego. Jeżeli dodamy jej kolory, otrzymamy kolor niebieski. Gorący niebieski kolor jest w istocie najgorętszy z gorętszych. Astrofizycy dobrze wiedzą, że najzimniejsze gwiazdy są czerwone, a najgorętsze niebieskie. Gdyby powieści o nocnych romansach były astrofizycznie poprawne, opisywałyby kochanków „rozgrzanych do niebieskości", a nie „rozgrzanych do czerwoności".

Dla gwiazdy o temperaturze 30 000 K maksimum natężenia promieniowania wypada w UV. Gdybym wybrał jeszcze gorętszą gwiazdę, jej kolor również byłby niebieski. Niebieski kolor oznacza, że niebieskie receptory w twoich oczach otrzymują więcej promieniowania niż receptory zielone i czerwone. Gwiazda o temperaturze 30 000 K jest niebieska, gwiazda o temperaturze 5800 K jest biała, gwiazda o temperaturze 1000 K jest czerwona.

A co z ludzkim ciałem? Jaką masz dziś temperaturę? Jeżeli nie masz gorączki, twoja temperatura wynosi około 310 K. Widmo twojego promieniowania ma maksimum w podczerwieni. Ile widzialnego światła emitujesz? W normalnych warunkach widzisz innych ludzi tylko dlatego, że odbijają widzialne światło. Jeżeli wyłączysz światło w pomieszczeniu, wszystko staje się czarne. Nie widzisz nikogo. Krzywa dla człowieka na ilustracji 4.4 mówi, że ludzie praktycznie nie emitują promieniowania w zakresie widzialnym. Ale skoro temperatura człowieka wynosi 310 K, nadal emitujemy w podczerwieni. Wystarczy użyć kamery podczerwonej albo podczerwonych gogli, aby się przekonać, że jesteśmy doskonale widoczni,

ponieważ promieniujemy silnie w podczerwieni. W następnym rozdziale umieścimy cały Wszechświat na takim wykresie.

5 – Jak gwiazdy emitują promieniowanie i energię (II)

Neil deGrasse Tyson

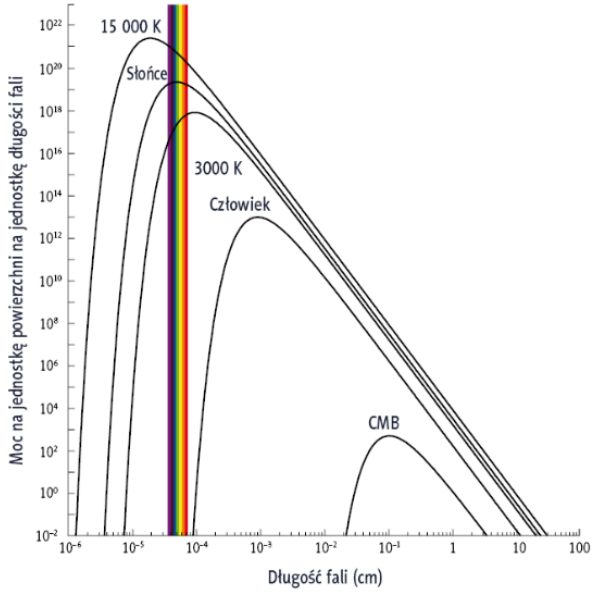
A teraz umieścimy cały Wszechświat na wykresie. W rozdziale 4 analizowaliśmy krzywe promieniowania termicznego gwiazd. Ilustracja 5.1 jest podobna, z tym że dodaliśmy jeden element. Na osi pionowej mamy natężenie (moc na jednostkę powierzchni na jednostkę długości fali). Na poziomej osi mamy długość fali — rosnącą w prawo. Zakres długości fali, który nazywamy światłem widzialnym, jest oznaczony paskiem w kolorach tęczy, tak jak poprzednio.

Ilustracja 5.1 pokazuje krzywe emisji termicznej dla Słońca o temperaturze 5800 K, dla gorącej gwiazdy o temperaturze 15 000 K, zimniejszej gwiazdy o temperaturze 3000 K oraz dla człowieka o temperaturze 310 K. Krzywa dla człowieka ma maksimum dla długości fali około 0,001 centymetra. Wewnątrz tej krzywej i nieco na prawo jest coś nowego — krzywa emisji dla temperatury 2,7 K, czyli temperatury całego Wszechświata! Jest to słynne promieniowanie tła docierające do nas ze wszystkich stron nieba. Jego maksimum wypada w zakresie mikrofal, więc jest nazywane mikrofalowym promieniowaniem tła (ang. cosmic microwave background, CMB). Zostało odkryte w Bell Laboratories w stanie New Jersey, w połowie lat sześćdziesiątych XX wieku. Arno Penzias i Robert Wilson testowali radioteleskop, zwany wówczas mikrofalową anteną rożkową. Gdy skierowali ją w niebo, antena natychmiast zaczęła rejestrować promieniowanie. Niezależnie od kierunku antena odbierała z dowolnego punktu na niebie mikrofalowy sygnał wskazujący, że źródłem jest obiekt o temperaturze około 3 K (obecna, dokładniejsza wartość wynosi 2,752 K). Jest to promieniowanie termiczne pozostawione przez Wielki Wybuch. Więcej na ten temat będzie w rozdziale 15.

Tak jak poprzednio będziemy analizować te wykresy na różne sposoby. Gdzie wypadają maksima dla poszczególnych krzywych? W różnych miejscach, czyli dla różnych długości fali. Ile całkowitej energii na sekundę emitują poszczególne źródła? Potrzebujemy metody dodawania powierzchni pod krzywą, aby określić ilość całkowitej energii emitowanej w ciągu sekundy. Ale najpierw musimy zdefiniować kilka pojęć.

Ciało doskonale czarne (ang. *blackbody*) to obiekt, który absorbuje całe padające nań promieniowanie. Ciało doskonale czarne o określonej temperaturze emituje promieniowanie (ang. *blackbody radiation*), dla którego funkcja rozkładu jest dokładnie taka, jak omawiane przez nas krzywe na ilustracjach 4.4 i 5.1. Określenie „ciało doskonale czarne” może na pierwszy rzut oka wydawać się nietrafione, lecz w rzeczywistości dobrze odzwierciedla

właściwości obiektów, które określamy tym terminem. Żadna omawiana wyżej gwiazda nie jest czarna — jedna świeci na niebiesko, jedna na biało, jedna na czerwono — lecz wszystkie kwalifikują się jako ciała doskonale czarne, tak jak opisałem je na ilustracji. Ciało doskonale czarne to w istocie bardzo proste pojęcie — jest to obiekt, który pochłania każdy rodzaj i każdą ilość padającego na nie promieniowania. Czymkolwiek zechcesz je nakarmić — promieniami gamma lub falami radiowymi — pochłonie wszystko. Czarne ciała pochłaniają całą energię, która pada na ich powierzchnię. Z tego powodu czarny nie jest szczególnie modnym kolorem w lecie. Ciała doskonale czarne wypromieniowują pochłoniętą energię; funkcja rozkładu emitowanego promieniowania jest taka jak na ilustracjach 4.4 i 5.1, a kształt oraz położenie krzywej zależy wyłącznie od temperatury ciała doskonale czarnego.



ILUSTRACJA 5.1. Termiczne promieniowanie Wszechświata. Widma promieniowania ciał doskonale czarnych w funkcji długości fali. Pionowa współrzędna określa energię na jednostkę czasu (czyli moc) na jednostkę długości fali, emitowaną przez jednostkę powierzchni obiektu o określonej temperaturze; jednostki są umowne. Poszczególne krzywe odpowiadają gwieździe o temperaturze powierzchni 15 000 K (widocznej w jasnoniebieskim kolorze), 5800 K (Słońce, kolor biały), 3000 K (gwiazda koloru czerwonego). Widzialna część widma jest oznaczona paskiem w kolorach tęczy. Dwie kolejne krzywe reprezentują promieniowanie człowieka (310 K) oraz mikrofalowe promieniowanie tła (CMB; 2,7 K), o którym powiemy więcej w rozdziale 15

Photo credit: Michael A. Strauss

Możesz coś podgrzać, czyli zwiększyć temperaturę, a następnie sprawdzić, ile wynosi nowa temperatura. A potem wracasz do ilustracji 5.1 i sprawdzasz, gdzie ta nowa temperatura pasuje. Mamy cudowne równanie, które opisuje wszystkie te krzywe. Są to funkcje rozkładu, zwane funkcjami Plancka, na cześć Maxa Plancka, którego już spotkaliśmy, i który pierwszy zapisał równania dla tych krzywych. Po prawej stronie znaku równości mamy energię na jednostkę czasu na jednostkę długości fali emitowaną przez jednostkę powierzchni dla określonej długości fali λ; wielkość po lewej stronie równania to natężenie I_λ, które zależy tylko od temperatury T ciała doskonale czarnego:

$$I_\lambda(T) = (2hc^2/\lambda^5) / (e^{hc/\lambda kT} - 1).$$

Spróbujmy przeanalizować elementy tego przełomowego równania. Po pierwsze, λ (lambda) to długość fali, nic nowego. Stała *e* to podstawa logarytmu naturalnego, która ma dedykowany przycisk na każdym naukowym kalkulatorze, zazwyczaj oznaczony symbolem *ex* (*e* do potęgi *x*). Wartość *e* wynosi 2,71828...; to jest liczba, podobnie jak π, której cyfry nigdy się nie kończą, ale to po prostu zwykła liczba. Litera *c* oznacza prędkość światła, już się z nią zetknęliśmy. Litera *k* to stała Boltzmanna. Litera *T* to po prostu temperatura, a *h* (wspomniana w rozdziale 4) to stała Plancka. Jeżeli ciało doskonale czarne ma określoną temperaturę, to jedyną zmienną jest długość fali λ. Jeżeli teraz będziesz stopniowo zmieniał wartość λ, zaczynając od bardzo małych wartości, aż po bardzo duże wartości, ze wzoru możesz wyliczyć natężenie I_λ jako funkcję długości fali — podobną do krzywych na ilustracji 5.1. To równanie, odkryte w 1900 roku przez Maxa Plancka, zrewolucjonizowało fizykę.

Wraz ze stałą *h*, nazwaną później stałą Plancka, jej twórca dał światu kwant, co uczyniło go ojcem mechaniki kwantowej. Przyjrzyj się wyrażeniu w pierwszym nawiasie po prawej stronie równania ($2hc^2/\lambda^5$). Co się dzieje z emitowaną energią, gdy długość fali rośnie? Zmniejsza się. Ułamek $1/\lambda^5$ zmierza do zera, gdy λ rośnie. Dla dużych wartości λ wykładnik $hc/\lambda kT$ jest mały. Matematycy wiedzą, że gdy wykładnik *x* w wyrażeniu *ex* jest mały, to całe wyrażenie *ex* jest w przybliżeniu równe 1+*x*. Zatem dla dużych wartości λ wykładnik $hc/\lambda kT$ jest mały, a wyrażenie $ehc/\lambda kT$ jest w przybliżeniu równe $1+hc/\lambda kT$. Jeżeli teraz odejmiemy od niego jedynkę, cały drugi nawias stanie się w przybliżeniu równy $hc/\lambda kT$. W rezultacie, gdy λ jest duże, cały wzór jest w przybliżeniu równy $I_\lambda(T) = (2hc^2/\lambda^5)/(hc/\lambda kT) = 2ckT/\lambda^4$. Ta zależność była znana jeszcze przed Planckiem jako wzór Raleigha-Jeansa. Jej autorami byli lord Raleigh oraz sir James Jeans. Gdy λ rośnie, natężenie $I_\lambda(T)$ bardzo szybko maleje, ponieważ $1/\lambda^4$ maleje. Ale co się dzieje z natężeniem, gdy λ maleje? Gdy λ maleje, λ^4 również maleje, natomiast $1/\lambda^4$ rośnie. Dla bardzo małych wartości λ natężenie rośnie do nieskończoności, lewa strona równania wybucha (w sprzeczności z wynikami eksperymentów). Ta sprzeczność została nazwana katastrofą ultrafioletową. Coś się nie zgadzało. Wilhelm Wien sformułował równanie, które zawierało eksponencjalne obcięcie dla małych długości fal. Równanie Wiena było zgodne z doświadczeniem dla małych

długości fali, ale nie zgadzało się dla dużych długości fali. W gruncie rzeczy przed 1900 rokiem nie rozumieliśmy rozkładów spektralnych promieniowania ciał doskonale czarnych. Dopiero Planck odkrył wzór, który pasował dla małych długości fali, dla dużych, i w ogóle dla wszystkich. Wzór Plancka zawiera stałą h, która kwantuje energię. Energia jest emitowana w określonych, skończonych porcjach (kwantach), co zapobiega katastrofie ultrafioletowej. Gdy przechodzimy do coraz mniejszych długości fali, rośnie czynnik $1/\lambda^5$ we wzorze Plancka, ale rośnie także eksponenta. Gdy λ maleje, $hc/\lambda kT$ rośnie, więc e podniesione do potęgi $hc/\lambda kT$ (czyli $e^{hc/\lambda kT}$) rośnie bardzo szybko. W rezultacie rośnie zarówno licznik, jak i mianownik wzoru Plancka (jedynka w mianowniku staje się nieistotna w porównaniu z $e^{hc/\lambda kT}$) i dochodzi do próby sił: kto szybciej rośnie — czynnik $1/\lambda^5$ czy czynnik $1/e^{hc/\lambda kT}$. Gdy λ dąży do zera, $1/^{ehc/\lambda kT}$ dąży do zera znacznie szybciej niż $1/\lambda^5$ i w rezultacie cała krzywa dąży do zera. Gdyby w mianowniku nie było czynnika eksponencjalnego, natężenie dążyłoby do nieskończoności, gdy λ dąży do zera, a z doświadczenia wiemy, że materia nie zachowuje się w taki sposób. Aby zrozumieć promieniowanie termiczne, niezbędne było wprowadzenie pojęcia kwantu, dzięki któremu równanie Plancka poprawnie opisuje funkcję rozkładu promieniowania.

Wzór Plancka zawiera w sobie wszystko. Można za jego pomocą obliczyć, gdzie jest maksimum funkcji. Newton opracował[11] matematyczne narzędzia, które umożliwiają takie obliczenia. Funkcja ma maksimum w punkcie, w którym jej nachylenie względem poziomej osi jest równe zeru. Aby znaleźć ten punkt, należy użyć Newtonowskiego rachunku różniczkowego, obliczyć pochodną funkcji i znaleźć punkt, w którym pochodna wynosi zero. Gdy takie obliczenia wykona się dla wzoru Plancka, wychodzi bardzo prosty wynik: $\lambda_{max} = C/T$, gdzie C jest nową stałą, którą także można wyznaczyć: jeżeli T jest wyrażone w kelwinach, $C = 2{,}898$ milimetra[12]. Możemy teraz znaleźć położenie maksimum. Gdy $T = 2{,}7$ K (temperatura CMB), λ_{max} jest nieco większe niż 1 milimetr, czyli 0,1 centymetra. Możesz to porównać z krzywą na ilustracji 5.1. Temperatura ludzkiego ciała jest około stu razy większa od temperatury CMB; maksimum promieniowania człowieka wypada w podczerwieni, na długości fali około 0,001 centymetra (co również pokazuje il. 5.1).

Piękne i proste. Gdy temperatura rośnie, położenie maksimum krzywej przesuwa się w kierunku coraz mniejszych długości fali. Wystarczy przyjrzeć się równaniu $\lambda_{max} = C/T$. T jest w mianowniku, więc dla ciała o dwukrotnie większej temperaturze maksimum wypadnie na dwukrotnie mniejszej długości fali. Tę zależność odkrył Wilhelm Wien, obecnie nazywamy ją prawem Wiena.

W jaki sposób możemy obliczyć całkowitą energię emitowaną w jednostce czasu przez jednostkę powierzchni? Musimy dodać przyczynki od wszystkich długości fali, czyli obliczyć pole powierzchni pod krzywą. W tym celu należy użyć rachunku całkowego, ponownie dziękując Newtonowi. Gdy scałkujemy funkcję Plancka dla wszystkich długości fali, otrzymamy kolejne piękne równanie:

$\Phi = \sigma T^4$.

Całkowita energia emitowana w ciągu sekundy przez jednostkową powierzchnię wynosi σT^4, gdzie $\sigma = 2\pi^5 k^4/(15c^2h^3) = 5{,}67 \times 10^{-8}$ wata na metr kwadratowy, a temperatura T jest w skali Kelvina. Jest to prawo Stefana-Boltzmanna. Zawdzięczamy je Josefowi Stefanowi i Ludwigowi Boltzmannowi, dwóm wybitnym przedstawicielom dziewiętnastowiecznej fizyki (Boltzmann, niestety, popełnił samobójstwo w wieku 62 lat). Jeżeli scałkujemy funkcję Plancka, otrzymamy także wartość stałej σ (sigma). A w jaki sposób Stefan i Boltzmann wyprowadzili swoje prawo, zanim Planck odkrył i opublikował swoje? Stefan odkrył je doświadczalnie, a Boltzmann wyprowadził na podstawie argumentów termodynamicznych.

Skoro całkowita energia emitowana w ciągu sekundy przez jednostkową powierzchnię wynosi σT^4, to jeżeli podwoimy temperaturę, strumień energii wzrośnie o czynnik $2^4 = 16$. Jeżeli potroimy temperaturę, strumień energii wzrośnie o czynnik $3^4 = 81$. Jeżeli temperatura wzrośnie o czynnik 4, strumień energii wzrośnie o $4^4 = 256$. Ten trend jest dobrze widoczny na ilustracji 5.1, która pokazuje, jak powiększają się kolejne krzywe wraz ze wzrostem temperatury.

A oto prosty sposób, aby zrozumieć, dlaczego ta formuła działa. Wyobraź sobie, że promieniowanie termiczne jest uwięzione w sześciennym pudełku. Powoli ściśnij pudełko, aż każdy jego bok zmniejszy się dwukrotnie. Całkowita liczba fotonów w pudełku pozostała taka sama, lecz objętość pudełka zmniejszyła się o czynnik 8, co oznacza, że liczba fotonów na centymetr sześcienny wzrosła o czynnik 8. Ściskanie pudełka spowodowało także zmniejszenie długości fali każdego fotonu o czynnik 2, czyli temperatura promieniowania termicznego w pudełku jest teraz dwukrotnie większa, ponieważ długość fali dla maksimum zmniejszyła się o czynnik 2. Energia każdego fotonu wzrosła dwukrotnie, podwajając tym samym całkowitą energię promieniowania zamkniętego wewnątrz pudełka. Wzrost energii fotonów pochodzi od energii, którą musisz zainwestować, aby zmniejszyć pudełko, naciskając na jego ściany, czemu przeciwstawia się ciśnienie promieniowania zamkniętego wewnątrz. Gęstość energii w pudełku jest proporcjonalna do gęstości fotonów oraz do energii pojedynczego fotonu, a zatem wzrosła o czynnik $8 \times 2 = 16$, a 16 jest równe 2^4. Wynika stąd, że gęstość energii promieniowania termicznego jest proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury, T^4.

Zdefiniujmy teraz kilka pojęć. Moc promieniowania (ang. *luminosity*) to jest całkowita energia emitowana przez gwiazdę w jednostce czasu. Jest mierzona w watach, podobnie jak moc żarówek. Stuwatowa żarówka ma moc równą 100 watów. Słońce ma moc równą $3{,}8 \times 10^{26}$ watów. Dość mocna żarówka [13].

A teraz zagadka. Załóżmy, że Słońce ma taką samą moc jak jakaś inna gwiazda o temperaturze powierzchni 2000 K. Dla uproszczenia przyjmijmy, że temperatura powierzchni Słońca wynosi 6000 K. Druga gwiazda ma tylko 2000 K, więc jest znacznie chłodniejsza i nie może emitować takiej samej ilości energii z metra kwadratowego jak Słońce. A ja teraz deklaruję, że Słońce ma taką samą moc jak ta gwiazda. Jak to jest możliwe? Jeżeli z tej gwiazdy wytnę

mały fragment o powierzchni jednego cala kwadratowego, ze Słońca wytnę też taki sam fragment i porównam je, to się przekonam, że jeden ma 2000 K, drugi ma 6000 K, więc jest trzy razy gorętszy, poza tym niczym się nie różnią. Fragment wycięty ze Słońca emituje więcej energii w jednostce czasu niż fragment wycięty z gwiazdy. O ile więcej? Osiemdziesiąt jeden razy więcej. W takim razie jak to jest możliwe, że ta gwiazda emituje tyle samo energii w jednostce czasu co Słońce? Oprócz temperatury dwie gwiazdy muszą się jeszcze czymś różnić, skoro jednakowo jasno świecą — druga gwiazda musi mieć większą powierzchnię niż Słońce. Jej powierzchnia musi być osiemdziesiąt jeden razy większa. To musi być czerwony olbrzym o powierzchni osiemdziesiąt jeden razy większej, aby skompensować osiemdziesiąt jeden razy mniejszą emisję energii z każdego cala kwadratowego. Wykorzystamy teraz nasze równania. Pole powierzchni sfery o promieniu r wynosi $4\pi r^2$ — wiemy to ze szkoły. Jeżeli moc gwiazdy jest równa energii emitowanej w jednostce czasu, a energia emitowana w jednostce czasu przez jednostkę powierzchni wynosi σT^4, to teraz mamy kolejne piękne równanie:

$$L_S = \sigma > T_S^4 \times (4\pi r_S^2).$$

Analogiczne równanie mamy dla drugiej gwiazdy. Używając gwiazdki jako indeksu dla tej gwiazdy, dostajemy jej moc $L_* = \sigma T_*^4 \times (4\pi r_*^2)$. Mamy teraz równanie dla obu gwiazd. Na początku tego przykładu zadeklarowałem, że $L_S = L_*$. Stwierdziłem także, że nie muszę znać powierzchni Słońca, ponieważ problem dotyczy proporcji między różnymi wielkościami, a nie wielkości bezwzględnych. Można wiele zrozumieć na temat Wszechświata, rozważając wyłącznie proporcje.

Podzielmy teraz nasze dwa równania stronami:

$$L_S/L_* = \sigma T_S^4 \times (4\pi r_S^2)/\sigma T_*^4 \times (4\pi r_*^2).$$

I co dalej? Możemy uprościć prawą stronę, usuwając (dzieląc) jednakowe czynniki z licznika i mianownika. Na początek podzielimy licznik i mianownik prawej strony równania przez czynnik σ. W tym przypadku nie interesuje mnie nawet konkretna wartość σ, ponieważ porównuję moce dwóch gwiazd, więc wspólne stałe, które występują dla obu gwiazd, wzajemnie się kasują. Na tej samej zasadzie upraszczamy prawą stronę równania przez czynnik 4, następnie czynnik π. A teraz zajmijmy się lewą stroną równania. Mamy tam iloraz L_S/L_*. Jest on równy 1, ponieważ zadeklarowałem, że obie gwiazdy mają jednakową moc. W rezultacie dostajemy prostsze równanie: $1 = T_S^4 r_S^2/T_*^4 r_*^2$. Temperatura Słońca wynosi 6000 K, temperatura gwiazdy wynosi 2000 K. Łatwo sprawdzić, że $6000^4/2000^4$ daje tyle samo, co 3^4, czyli 81. Mamy zatem $1 = 81 r_S^2/r_*^2$. Pomnóżmy obie strony przez r_*^2, co daje $r_*^2 = 81 r_S^2$. A teraz po obu stronach wyciągnijmy pierwiastek kwadratowy: $r_* = 9 r_S$. Promień chłodniejszej gwiazdy (o takiej samej mocy jak moc Słońca) jest dziewięć razy większy od promienia Słońca! Pole powierzchni jest proporcjonalne do

kwadratu promienia, więc pole powierzchni tej gwiazdy jest osiemdziesiąt jeden razy większe od pola powierzchni Słońca. Te równania są niezwykle płodne.

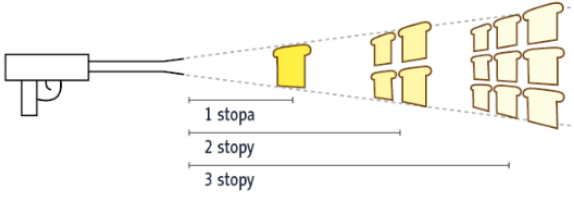
Mogłem podać inny przykład. Mogliśmy zacząć od gwiazdy, która ma taką samą temperaturę jak Słońce, lecz osiemdziesiąt jeden razy większą moc. Obie gwiazdy emitują taką samą ilość energii w jednostce czasu z jednego cala kwadratowego powierzchni, więc druga gwiazda musi mieć osiemdziesiąt jeden razy większą powierzchnię i dziewięć razy większy promień od Słońca. Równanie ma takie same czynniki, lecz wstawiamy różne wartości dla różnych zmiennych. Tylko tyle i aż tyle.

Przypomnijmy sobie (rozdz. 2), że najgorętsza część dnia nie wypada w południe, lecz nieco później, ponieważ grunt absorbuje światło widzialne. Absorpcja światła stopniowo podnosi temperaturę gruntu, który wypromieniowuje energię w zakresie podczerwonym. Grunt zachowuje się jak ciało doskonale czarne — absorbuje energię ze Słońca, a następnie wypromieniowuje ją w powietrze zgodnie z przepisem podanym przez funkcję Plancka. Temperatura gruntu wynosi około 300 K (273 K plus temperatura gruntu w stopniach Celsjusza — jeżeli wynosi 27 °C, to w sumie daje równo 300 K).

Możesz zadać sobie pytanie, jaka jest moc twojego ciała. Wstaw do równania swoją temperaturę w kelwinach, czyli 310 K, podnieś do czwartej potęgi, pomnóż przez sigmę, a otrzymasz ilość energii, jaką emituje jednostka powierzchni twojego ciała w jednostce czasu. Jeżeli pomnożysz to przez całkowitą powierzchnię skóry (około 1,75 metra kwadratowego dla przeciętnej dorosłej osoby), otrzymasz swoją moc, czyli liczbę watów emitowanych w postaci promieniowania, na ogół w zakresie podczerwonym. Nie świecisz światłem widzialnym jak żarówka, lecz z całą pewnością można wyznaczyć twoją moc w watach. Policzmy. Stała Stefana-Boltzmanna σ jest równa $5{,}67 \times 10^{-8}$ watów na metr kwadratowy. Temperatura ma być w kelwinach, więc potrzebujemy $(310)^4$. 310^4 to jest $9{,}24 \times 10^9$. Pomnóż to przez $5{,}67 \times 10^{-8}$, co daje 523 waty na metr kwadratowy. Pomnóż przez powierzchnię skóry i wychodzi, że emitujesz 916 watów. To bardzo dużo, ale zwróć uwagę, że całkiem sporo także absorbujesz. Jeżeli siedzisz w pomieszczeniu o temperaturze 300 K (27 °C), twoja skóra absorbuje około 803 watów zgodnie z tym samym wzorem. Twój organizm musi zatroszczyć się o różnicę, aby utrzymać stałą temperaturę. Około stu brakujących watów pochodzi z pożywienia i przemiany materii. Ciepłokrwiste zwierzęta, które utrzymują wyższą temperaturę ciała niż otoczenie, muszą jeść więcej niż zimnokrwiste gatunki. Gdy instalujesz klimatyzację, powinieneś zadać sobie dwa istotne pytania: Jak duże jest pomieszczenie? Jakie inne źródła energii są obecne? Drugie pytanie obejmuje między innymi kwestię, ile jest włączonych żarówek i ile osób jest obecnych, ponieważ każda osoba jest energetycznie równoważna żarówce o określonej mocy. Aby utrzymać pożądaną temperaturę, klimatyzator musi zrównoważyć (czyli pochłonąć, odprowadzić i wyemitować na zewnątrz) sumaryczną moc emitowaną przez wszystkie włączone żarówki i wszystkie organizmy obecne w pomieszczeniu.

Wrzućmy jeszcze jedno pojęcie, zwane jasnością obserwowaną (ang. *brightness*). Jasność obserwowana gwiazdy jest równa energii, która w jednostce czasu przechodzi przez jednostkę powierzchni obiektywu twojego teleskopu. Jasność obserwowana mówi, jak jasna wydaje się gwiazda, gdy na nią patrzysz. Zależy od mocy gwiazdy oraz od jej odległości. Podchodząc intuicyjnie do tej kwestii, jeżeli obserwujesz jakiś świecący obiekt o określonej jasności obserwowanej, a ja odsunę go na większą odległość, to jego jasność obserwowana się zmniejszy. Z drugiej strony moc w żaden sposób nie zależy od odległości; moc to energia emitowana przez dane źródło w jednostce czasu. Nie zależy od tego, czy i jak obserwujesz źródło. Stuwatowa żarówka ma moc 100 watów niezależnie od tego, w którym miejscu Wszechświata ją wkręcisz. Natomiast jasność obserwowana zależy od odległości obserwatora od źródła.

Jasność obserwowana jest moim ulubionym i zarazem bardzo prostym pojęciem. Jesteś gotowy? Na ilustracji 5.2 jest przedstawiony przyrząd, którego nigdy sam nie zbudowałem (jeżeli masz ochotę, możesz go opatentować): pistolet na masło. Z tyłu ładujesz kostkę masła, a z przodu jest dysza, z której wypływa masło.



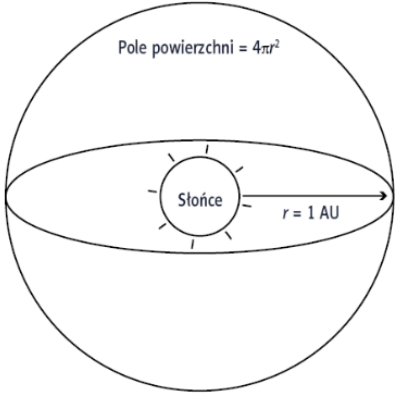
ILUSTRACJA 5.2. Pistolet na masło. Może posmarować jedną kromkę odległą o stopę, cztery kromki odległe o 2 stopy lub dziewięć kromek odległych o 3 stopy

Credit: J. Richard Gott

Umieść kromkę chleba stopę od pistoletu. Dysza jest tak skalibrowana, że z odległości stopy dokładnie pokryje całą kromkę masłem. Jeżeli lubisz mieć kromkę dokładnie i równo posmarowaną na całej powierzchni, to ten wynalazek jest dla ciebie. Załóżmy teraz, że chcę zaoszczędzić, jak każdy rozsądny biznesmen: chciałbym użyć takiej samej ilości masła, lecz posmarować więcej kromek, nadal równo i dokładnie. Pierwsza kromka była umieszczona w odległości stopy — odsuńmy się teraz na 2 stopy. Z podwojonej odległości pistolet obejmuje powierzchnię na dwie kromki szeroką i na dwie kromki wysoką. Masło pokryje 2 × 2, czyli cztery kromki. Podwajając odległość, możesz posmarować cztery kromki. Jeżeli odsuniemy kromki na 3 stopy, pistolet pokryje 3 × 3, czyli dziewięć kromek. Jedna kromka, cztery kromki, dziewięć kromek. Ale ile masła jest na kromce odległej o 3 stopy w porównaniu z pierwszą kromką odległą o stopę? Tylko jedna dziewiąta. Nadal jest posmarowana, ale dostała tylko jedną dziewiątą. Dla klienta to zła wiadomość, ale dobrze odzwierciedla fundamentalne prawo przyrody, które chcę zilustrować na tym przykładzie. Gdyby zamiast masła było światło, jego natężenie zmniejszałoby się dokładnie w takim samym stopniu jak zmniejsza się ilość masła na kromkach. Światło porusza się po liniach prostych, podobnie jak masło, i rozchodzi się w taki sam sposób jak masło. W odległości 2 stóp natężenie światła żarówki jest równe 1/4

natężenia w odległości stopy. W odległości 3 stóp natężenie spadnie do 1/9; w odległości 4 stóp do 1/16; w odległości 5 stóp do 1/25; i tak dalej. Natężenie zmniejsza się jak odwrotność kwadratu odległości. Otrzymaliśmy ważne prawo fizyki, które mówi, jak natężenie światła zależy od odległości — jest to prawo odwrotnych kwadratów. Podobnie zachowuje się grawitacja. Pamiętasz prawo Newtona, $Gm_a m_b/r^2$? Promień r podniesiony do kwadratu w mianowniku wskazuje, że mamy do czynienia z prawem odwrotnych kwadratów, ponieważ grawitacja zachowuje się podobnie jak nasz pistolet na masło. Grawitacja i masło działają tak samo.

Wyobraźmy sobie teraz źródło światła, takie jak Słońce, emitujące promieniowanie we wszystkich kierunkach (il. 5.3). Załóżmy, że otaczamy Słońce wielką sferą o promieniu r równym promieniowi ziemskiej orbity (1 AU).



ILUSTRACJA 5.3. Słońce zamknięte w kuli. Promienie Słońca rozprzestrzeniają się na powierzchni $4\pi r^2$, gdy przecinają sferę o promieniu r

Credit: J. Richard Gott

Słońce emituje promieniowanie we wszystkich kierunkach, a ja ustawiam detektor, który pochłania niewielką część słonecznego światła przechodzącego przez ogromną sferę o promieniu równym mojej odległości (1 AU) od Słońca. Jaka jest powierzchnia tej sfery? Jest równa $4\pi r^2$, gdzie r jest promieniem sfery. Spośród wszystkich promieni, które wychodzą ze Słońca, mój detektor łapie tylko niewielki ułamek, równy powierzchni ekranu detektora podzielonej przez powierzchnię całej tej ogromnej sfery ($4\pi r^2$). Jeżeli teraz oddalę się na podwójną odległość (2 AU), mój detektor ma nadal taką samą powierzchnię, lecz promień mojej sfery się podwoi (2 AU), a powierzchnia, przez którą teraz przechodzą wszystkie promienie Słońca, będzie czterokrotnie większa. Mój detektor złapie teraz cztery razy mniej fotonów, niż łapał wtedy, gdy był w odległości 1 AU. Jasność obserwowana jest mierzona w watach na metr kwadratowy ekranu detektora. Aby obliczyć jasność obserwowaną, którą rejestruję w odległości r od Słońca, zacznę od mocy Słońca (w watach) i podzielę przez pole tej sferycznej powierzchni. Wynik jest w watach na metr kwadratowy. Mnożąc przez powierzchnię ekranu detektora (na przykład mojego teleskopu), dostanę ilość energii padającej w czasie jednej sekundy na ekran. Jeżeli moc Słońca wynosi L, to jasność obserwowana B Słońca w moim położeniu wynosi $B = L/4\pi r^2$, gdzie r jest moją odległością od Słońca. Gdy moja odległość od Słońca rośnie,

mianownik ($4\pi r^2$) także rośnie, zmniejszając jasność obserwowaną. Na Neptunie, który jest trzydzieści razy dalej od Słońca niż Ziemia, Słońce wydaje się dziewięćset razy słabsze niż u nas.

Załóżmy, że dwie gwiazdy mają mają taką samą jasność obserwowaną, lecz skądinąd wiemy, że moc jednej z nich jest dziesięć tysięcy razy większa. Co możemy stwierdzić na temat tych dwóch gwiazd? Gwiazda o większej mocy musi być dalej. O ile dalej? Sto razy dalej. Skąd wziąłem sto? Tak, sto do kwadratu równa się dziesięć tysięcy.

Właśnie poznałeś niektóre z najważniejszych odkryć astrofizyki z końca XIX i początku XX wieku. W szczególności Boltzmann i Planck stali się bohaterami dzięki swoim odkryciom oraz wyjaśnieniu niektórych spośród praw i zjawisk, które poznałeś w tym i poprzednim rozdziale.

6 – Widma promieniowania gwiazd

Neil deGrasse Tyson

Co się dzieje we wnętrzu gwiazdy? Gwiazda nie jest latarką, którą można włączyć, a światło wyłania się z jej powierzchni. Głęboko w rdzeniu gwiazdy termojądrowe procesy generują energię, która powoli przemieszcza się w stronę powierzchni. Gdy dotrze do powierzchni, jest uwalniana i oddala się z prędkością światła, docierając do nas i do innych zakątków Wszechświata. Przeanalizujemy teraz, jak fotony powstające we wnętrzu gwiazdy mozolnie przedzierają się przez jej materię[14].

Zaczniemy od pytania, z czym fotony walczą podczas wędrówki ku powierzchni Słońca. Nasze Słońce, jak większość gwiazd, jest zbudowane głównie z wodoru, który jest pierwiastkiem numer jeden we Wszechświecie: 90% wszystkich jąder to jądra wodoru, około 8% to hel, a pozostałe 2% stanowią wszystkie pozostałe pierwiastki razem wzięte. Cały wodór i większość helu pochodzi z Wielkiego Wybuchu, wraz z odrobiną litu. Pozostałe pierwiastki zostały później wytworzone w gwiazdach. Jeżeli jesteś zwolennikiem poglądu, że życie na Ziemi jest w jakimś sensie szczególne czy wyjątkowe, musisz się pogodzić z następującymi faktami: jeżeli ustawimy w kolejności pierwszych pięć najbardziej rozpowszechnionych we Wszechświecie pierwiastków — wodór, hel, tlen, węgiel, azot — zadziwiająco blisko przypominają składniki ludzkiego ciała. Która molekuła jest numerem jeden w twoim ciele? To woda — 80% ciała stanowi H_2O. Poddaj H_2O dysocjacji, a otrzymasz wodór jako pierwiastek numer jeden w ludzkim ciele. Nie ma w nim helu, z wyjątkiem tego momentu, gdy wdychasz hel z balonika i przez chwilę twój głos brzmi jak głos Myszki Miki. Hel znajduje się w prawej kolumnie układu okresowego, na czele gazów szlachetnych. Jest chemicznie nieaktywny, ponieważ jego powłoka elektronowa jest zamknięta — nie ma w niej miejsca na elektrony, które mogłyby funkcjonować jako wiązania chemiczne z innymi atomami. Nawet gdyby był pod ręką, do niczego nie dałoby się go użyć.

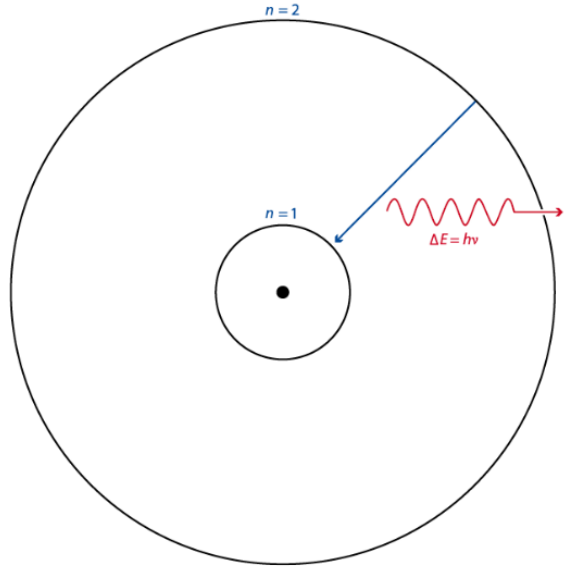
Kolejnym pierwiastkiem w ludzkim ciele jest tlen, również obecny głównie w molekułach wody. Po tlenie mamy węgiel — podstawę całej naszej chemii. Następnie mamy azot. Pomijając hel, który z niczym nie tworzy wiązań chemicznych, jesteśmy dokładnym odwzorowaniem — w proporcjach jeden do jeden — zestawu najbardziej rozpowszechnionych we Wszechświecie pierwiastków. Gdybyśmy byli zbudowani z jakiegoś rzadko spotykanego pierwiastka, na przykład jednego z izotopów bizmutu, moglibyśmy sądzić, że zdarzyło się coś szczególnego. Musimy jednak z pokorą przyznać, że nie jesteśmy chemicznie wyjątkowi, gdy widzimy w naszych ciałach te same pierwiastki, które powszechnie występują w całym kosmosie. Z drugiej strony to bardzo pouczające, a nawet budujące, gdy zdajemy sobie sprawę, że jesteśmy w istocie kosmicznym pyłem. Jak zobaczymy w kilku kolejnych rozdziałach, tlen, węgiel i azot powstały w gwiazdach w ciągu miliardów lat, które upłynęły od Wielkiego Wybuchu. Urodziliśmy się w tym Wszechświecie, żyjemy w tym Wszechświecie i Wszechświat jest w nas.

Rozważmy gazowy obłok — coś w rodzaju kosmicznej mieszaniny wodoru, helu i reszty — i patrzmy, co się będzie działo. Atom składa się z jądra oraz krążących wokół niego elektronów. Jądro składa się z protonów i neutronów. Wyobraźmy sobie prosty, choć formalnie niezbyt poprawny model atomu, który Niels Bohr sformułował ponad sto lat temu. Gdy elektron znajduje się na najciaśniejszej orbicie, atom jest w stanie podstawowym — nazwiemy ten stan poziomem nr 1. Wyższy poziom energii to stan wzbudzony — nazwiemy ten stan poziomem nr 2. Narysujmy taki dwupoziomowy atom (il. 6.1); dla prostoty obrazu pominiemy inne poziomy energii. Atom ma jądro oraz chmurę elektronów, o których mówimy, że znajdują się „na orbicie" wokół jądra, ale nie są to orbity, które znamy z rozważań na temat grawitacji, planet i Newtona. W istocie zamiast słowa „orbita" wprowadzimy teraz nowe, pochodne określenie: orbital. Słowo „orbital" pochodzi oczywiście od orbity. W jakimś sensie można mówić o pewnego rodzaju podobieństwie, lecz orbitale mają znacznie bogatszy repertuar kształtów i zupełnie inny sens fizyczny. Reprezentują „chmury prawdopodobieństwa" określające szanse znalezienia elektronów. Niektóre chmury elektronowe są sferyczne, inne są wydłużone, jeszcze inne przybierają bardziej skomplikowane kształty. Istnieją całe rodziny kształtów. Różnią się także energią. W dalszej części będziemy po prostu mówić o poziomach energii, które reprezentują układy orbitali elektronowych — obszary przestrzeni wokół jąder atomowych zajmowane przez elektrony. Popatrzmy na ilustrację 6.1.

Jądro reprezentuje czarna kropka w środku. Poziom energii $n = 1$ odpowiada elektronowi na sferycznej orbicie położonej najbliżej jądra. Poziom energii $n = 2$ reprezentuje sferyczny orbital położony dalej od jądra. Poziom energii $n = 2$ odpowiada elektronowi, który jest słabiej związany z jądrem. Elektrony i protony się przyciągają, więc przeniesienie elektronu dalej od jądra, na dalszy orbital, wymaga energii. Poziom energii $n = 2$ jest wyżej niż poziom energii $n = 1$.

Elektron może się znaleźć na poziomie energii nr 1, czyli w stanie podstawowym, lub na poziomie nr 2, w stanie wzbudzonym. Nie może znaleźć

się nigdzie pomiędzy poziomami 1 i 2. Nie ma tam dla niego miejsca. To jest świat kwantów. Nie ma tam ciągłości. Aby elektron mógł przeskoczyć na następny poziom, musisz dostarczyć mu energii w takiej czy innej postaci. Jednym ze źródeł tej energii może być foton, ale nie byle jaki. To musi być foton o energii równej różnicy energii obu poziomów. Gdy taki foton natrafi na elektron w atomie, elektron może pochłonąć foton i przeskoczyć na poziom nr 2. Jeżeli foton ma nieco mniejszą lub nieco większą energię, mija elektron i leci dalej. Atomy, w odróżnieniu od ludzi, nie są zainteresowane dłuższym pozostawaniem w stanie wzbudzonym — elektron na poziomie energii nr 2 po krótkim czasie spontanicznie przeskoczy do niższego poziomu nr 1 (co wskazuje niebieska strzałka na il. 6.1).



ILUSTRACJA 6.1. Poziomy energii atomu. Schematyczny obraz atomu z dwoma orbitalami, $n = 1$ i $n = 2$. Jeżeli elektron startuje z poziomu nr 2 i spada na poziom nr 1, emituje foton o energii $\Delta E = h\nu$, gdzie $\Delta E = E_2 - E_1$ stanowi różnicę energii poziomu nr 2 i poziomu nr 1. Gdy elektron znajduje się na poziomie nr 1, może pochłonąć foton o energii $\Delta E = h\nu$ i przeskoczyć na poziom nr 2

Credit: Michael A. Strauss

Elektron zazwyczaj nie pozostaje zbyt długo w stanie wzbudzonym. W niektórych przypadkach „krótki czas” oznacza miliardowy ułamek sekundy. Gdy wraca na niższy poziom, emituje foton o takiej samej energii jak foton,

który został pochłonięty przy przeskoku na wyższy poziom. Przeskok w górę wiąże się z absorpcją fotonu. Przeskok w dół wiąże się z emisją fotonu, jak pokazuje czerwona strzałka na ilustracji 6.1. Zgodnie ze słynnym wzorem Einsteina energia E tego fotonu jest równa $h\nu$, gdzie h jest stałą Plancka, a ν jest częstotliwością fotonu. Energia emitowanego fotonu jest dokładnie równa różnicy energii dwóch poziomów, ΔE (grecka litera Δ zazwyczaj oznacza różnicę lub zmianę jakiejś wielkości fizycznej). Równanie $\Delta E = h\nu$ pozwala obliczyć częstotliwość emitowanego fotonu, gdy elektron spada z poziomu 2 na poziom 1.

Czy bawiłeś się kiedyś jednym z tych świecących w ciemności (ang. *glow-in-the-dark*) frisbee? Aby mogły świecić w ciemności, najpierw musimy je na pewien czas pozostawić w świetle dziennym lub w świetle żarówki. Co wtedy się dzieje? Elektrony związane w atomach i cząsteczkach zabawki absorbują fotony i przeskakują na wyższe poziomy energii (każdy atom ma nieskończenie wiele wzbudzonych poziomów energii). Projektanci zabawki wybierają takie materiały, w których elektrony długo pozostają na wzbudzonych poziomach, zanim przeskoczą w dół. Przeskakując, emitują widzialne światło. Po pewnym czasie, gdy wszystkie elektrony powrócą do pierwotnych położeń, zabawka przestaje świecić. Wszystkie frisbee oraz różne świecące w ciemności ubrania i szkielety, które miałeś w dzieciństwie, działają na tej samej zasadzie.

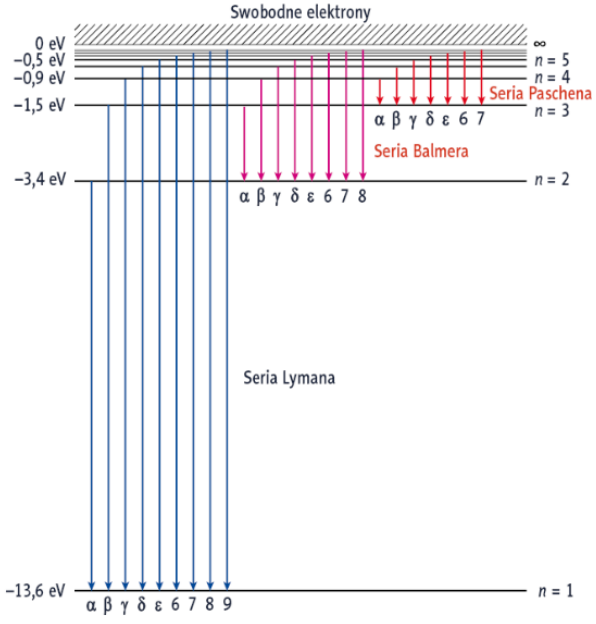
Energia absorbowana przez elektron może pochodzić od fotonu, lecz istnieją także inne źródła. Elektron może zostać kopnięty przez inny atom w trakcie zderzenia, a kopnięcie może spowodować przeskok elektronu na wyższy poziom. W takim przypadku energia kinetyczna jest źródłem. Takie procesy mogą zachodzić w obłokach wodorowego gazu w przestrzeni kosmicznej. Zastanówmy się najpierw, jaka jest temperatura takiego obłoku. Temperatura, wyrażona w kelwinach, jest proporcjonalna do średniej energii kinetycznej molekuł lub atomów w obłoku. Ruch obłoku jako całości nie wpływa na pomiar temperatury. Energia kinetyczna to oczywiście energia związana z ruchem cząstek, więc im wyższa temperatura, tym szybciej cząstki gazu biegają tam i z powrotem wewnątrz obłoku. Jeżeli jestem elektronem w stanie podstawowym i nagle zostanę kopnięty, to mogę zapytać, jaka jest energia tego kopnięcia. Jeżeli energia kopnięcia mogłaby przenieść mnie tylko kawałek drogi od poziomu 1 do poziomu 2, to pozostaję na poziomie 1. Jeżeli jednak energia kopnięcia jest dokładnie taka, jakiej potrzebuję, aby przenieść się na drugi poziom, absorbuję ją i przeskakuję na poziom 2.

W zależności od temperatury w całej populacji atomów pewna część elektronów pozostaje stale na wyższym poziomie energii. Obłok może pozostawać w pewnego rodzaju stanie równowagi, jeżeli przeskoki elektronów na niższe poziomy energii kompensuje odpowiednia liczba kopnięć w górę. Trochę przypomina to żonglera, który cały czas utrzymuje w powietrzu pewną liczbę kul. Stan równowagi jest funkcją temperatury. W niskiej temperaturze większość elektronów pozostaje na poziomie 1, a tylko niewielka ich liczba utrzymuje się na poziomie 2. Gdy temperatura rośnie, więcej elektronów zostaje kopniętych na poziom 2.

Połączmy wszystkie powyższe wątki. Rozważmy międzygwiezdny obłok gazu, przez który przechodzi promieniowanie gwiazdy o temperaturze powierzchni 10 000 K. W porównaniu z atomem wodoru większość atomów ma bardzo złożone układy poziomów energii. Przy przejściu promieniowania przez obłok różne atomy, z różnymi układami poziomów energii, sieją spustoszenie w gładkim, termicznym widmie, emitowanym przez taką gwiazdę. Przyjrzymy się teraz, jak zmienia się to widmo.

Najpierw pokażę ci pełny obraz atomu wodoru. Wodór, podobnie jak wszystkie inne atomy, ma nieskończoną liczbę poziomów energii odpowiadających orbitalom, które są coraz bardziej oddalone od jądra: $n = 1$ (poziom podstawowy — najbardziej wewnętrzny orbital), $n = 2$ (pierwszy poziom wzbudzony), $n = 3$, $n = 4$, $n = 5$, $n = 6$, … , $n = \infty$. Poziomy o niższej energii (elektrony na tych poziomach są silniej związane z jądrem) leżą niżej na diagramie (il. 6.2).

W wodorze pierwszy stan wzbudzony, $n = 2$, leży w trzech czwartych wysokości. Trochę wyżej leżą poziomy $n = 3$, $n = 4$, $n = 5$ i tak dalej. Nieskończony szereg wysoko leżących poziomów zbiega się do granicy, której umownie przypisujemy energię równą zeru. Elektron o dużej liczbie n zajmuje bardzo duży orbital i jest słabiej związany z jądrem. Energię w atomach mierzymy w elektronowoltach (eV). Jeden elektronowolt jest równy energii potrzebnej do przeniesienia elektronu przez różnicę potencjałów równą jednemu woltowi. Powiedzmy, że masz latarkę, która działa na dziewięciowoltową baterię. Poruszając się wzdłuż przewodów, każdy elektron generuje 9 eV energii w postaci światła i ciepła. Dziewięciowatowa latarka może przepuścić przez żarówkę $6{,}24 \times 10^{18}$ elektronów na sekundę, generując $9 \times (6{,}24 \times 10^{18})$ eV na sekundę (czyli 9 watów) w postaci światła i ciepła. Jeden elektronowolt to bardzo mała ilość energii; jest to wygodna jednostka, gdy rozważamy energię związaną z przejściami elektronów w atomach. Dla przykładu −13,6 eV na ilustracji 6.2 to energia poziomu $n = 1$. Zgodnie z przyjętą konwencją ta energia jest ujemna. Aby elektron pozostający na poziomie $n = 1$ usunąć z atomu, musisz mu dostarczyć 13,6 eV energii. Mówimy, że 13,6 eV to jest energia wiązania atomu w stanie podstawowym $n = 1$. Co się stanie, jeżeli elektron w stanie podstawowym napotka foton o energii większej niż 13,6 eV? Czy elektron może zaabsorbować ten foton? Jeżeli to zrobi, będzie miał dość energii, aby wyskoczyć powyżej $n = \infty$. A co jest powyżej $n = \infty$? Tam jest wolność. Jeżeli elektron wyskoczy powyżej zera energii, ucieknie z atomu i pozostawi proton samemu sobie. Mówimy wtedy, że atom uległ jonizacji — został pozbawiony jednego elektronu (atom ma teraz niezerowy ładunek elektryczny i stał się jonem). Uciekający elektron ma teraz energię powyżej zera; ta „nadmiarowa” energia staje się energią kinetyczną uciekającego elektronu. Jak łatwo odgadnąć, atom można także zjonizować, zderzając go z innym atomem.



ILUSTRACJA 6.2. Diagram poziomów energii dla wodoru. Poziome linie oznaczają różne poziomy energii elektronu w atomie wodoru, w elektronowoltach (eV). Pionowe strzałki wskazują przejścia między poszczególnymi poziomami. Wykonując takie przejście, elektron emituje foton o energii równej różnicy energii obu poziomów. Pokazane są przejścia do pierwszego (podstawowego) poziomu (seria Lymana odpowiadająca fotonom w ultrafioletowej części widma); do drugiego poziomu (seria Balmera, fotony w widzialnej części widma); do trzeciego poziomu (seria Paschena, fotony w bliskiej podczerwieni). Diagram pokazuje przejścia w dół, którym towarzyszy emisja fotonu. Jeżeli elektron znajduje się na poziomie $n = 3$ i przeskoczy do poziomu $n = 2$, jak wskazuje najkrótsza czerwona strzałka w serii Balmera, wyemituje foton należący do linii Hα serii Balmera, o energii 1,9 eV

Credit: Michael A. Strauss

Możemy teraz spróbować zrozumieć, jak świeci gwiazda o temperaturze powierzchni 10 000 K. Jest to temperatura na tyle wysoka, że niewielki, ale istotny ułamek atomów wodoru znajduje się w pierwszym stanie wzbudzonym $n = 2$. Wybrałem taką gorącą gwiazdę, ponieważ temperatura 10 000 K uwydatnia zjawiska, które zamierzam teraz opisać. Głęboko wewnątrz gwiazdy widmo promieniowania ma rozkład termiczny określony przez piękną krzywą Plancka. Fotony promieniowania termicznego, próbując przedostać się przez zewnętrzne warstwy gwiazdy, natrafiają na atomy wodoru. Niektóre atomy znajdują się w pierwszym stanie wzbudzonym $n = 2$; elektrony w tych atomach są gotowe pochłonąć foton o odpowiedniej energii. Fotony widma termicznego mają różną energię. Wiele z nich należy do widzialnej części widma, a w gazie atomów wodoru o temperaturze 10 000 K jest sporo atomów w pierwszym stanie wzbudzonym $n = 2$, więc te atomy pochłaniają odpowiednie fotony i przeskakują na wyższe poziomy energii.

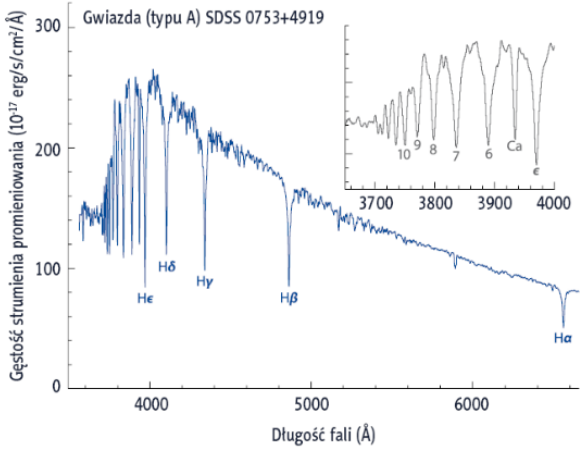
Ale nie wszystkie fotony są pochłaniane — tylko te, których długość fali jest dopasowana do konkretnego przejścia elektronowego. Na przykład elektron na poziomie $n = 2$ (o energii −3,4 eV) może pochłonąć foton o takiej energii, aby mógł przeskoczyć na poziom $n = 3$ (o energii −1,5 eV). Różnica energii tych dwóch poziomów wynosi 1,9 eV (zob. il. 6.2). Tyle energii musi otrzymać elektron, aby wykonać skok w górę, więc musi zaabsorbować foton o energii

1,9 eV. Taki foton nosi nazwę Hα (H-alfa). Jego długość fali wynosi 6563 angstremów, czyli 656,3 nanometra, i odpowiada kolorowi czerwonemu (burgundowemu). Gdy foton o tej długości fali natrafia na atom wodoru w stanie $n = 2$, przenosi elektron na poziom $n = 3$; foton zostaje pochłonięty i znika z widma promieniowania. Gdy taki los spotka wiele fotonów o długości fali odpowiadającej linii Hα, w widmie Plancka pojawi się minimum (ang. *dip* — głębokie, wąskie wcięcie) wokół długości fali 6563 angstremów, zwane linią absorpcyjną Hα (H-alfa). Fotony o długości fali 4861 angstremów mogą przenosić elektrony z poziomu $n = 2$ na poziom $n = 4$, wycinając kolejne minimum w widmie, zwane linią absorpcyjną Hβ (H-beta). Kolejne linie noszą nazwy Hγ (H-gamma) o długości fali 4340 angstremów, Hδ (H-delta) o długości fali 4102 angstremów i tak dalej; fotony o jeszcze mniejszej długości fali mogą przerzucać elektrony z poziomu $n = 2$ na poziomy $n = 5$, $n = 6$... Promieniowanie o gładkim, ciągłym widmie Plancka wychodzące z wnętrza gwiazdy i wnikające w jej zewnętrzne warstwy zostaje częściowo pochłonięte przez elektrony; to, co wychodzi, nazywamy widmem absorpcyjnym. W tych miejscach widma, gdzie fotony zostały pochłonięte, pojawiły się wąskie, głębokie wąwozy, zwane liniami absorpcyjnymi. Jedna grupa tych linii jest nazywana serią Balmera: Hα, Hβ, Hγ, Hδ, Hε, a następnie H6, H7, H8 i tak dalej (nie oczekujemy, że ktoś pamięta tak dużo greckich liter). Odstępy między tymi liniami wynikają z różnic energii na diagramie. Ilustracja 6.3 pokazuje widmo gwiazdy o temperaturze 10 000 K. Okienko w prawym górnym rogu jest powiększeniem fragmentu widma w zakresie 3650-4000 angstremów.

Jeżeli spojrzymy na gwiazdę, której powierzchnia jest nieco cieplejsza, powiedzmy 15 000 K, sytuacja zmienia się drastycznie: elektrony w atomach są potrząsane tak mocno, że odrywają się od atomów: elektrony i protony biegają samodzielnie — atomy zostały zjonizowane. Zjonizowany wodór nie ma dyskretnych poziomów energii, więc nie absorbuje fotonów Balmera. Dlatego seria Balmera jest dobrze widoczna w widmach gwiazd o temperaturze 10 000 K, jednak nie jest widoczna w widmach gorętszych gwiazd.

Do tej pory rozważaliśmy, co się dzieje z wodorem. Dodajmy wapń, węgiel, tlen; wszystkie atomy w atmosferze gwiazd mogą brać udział w tej zabawie. Przedstawię teraz moją ulubioną analogię — drzewo. Pomyśl o zewnętrznej warstwie gwiazdy, jakby to było drzewo bombardowane (z wnętrza gwiazdy) przez mieszankę orzechów i żołędzi. Mamy armatę (wnętrze gwiazdy), która strzela orzechami i żołędziami (fotonami o różnej częstotliwości) w koronę drzewa. Na drzewie mieszkają rude wiewiórki pospolite, które żywią się żołędziami (fotony Hα). Wiewiórki widzą wszystkie nadlatujące pociski, lecz łapią tylko te, które lubią, czyli żołędzie. Na drugą stronę drzewa (na zewnątrz gwiazdy) przelatują wszystkie pociski oprócz żołędzi (promieniowanie termiczne minus fotony Hα). Dołóżmy teraz inny gatunek: wiewiórki szare. Co teraz przelatuje na drugą stronę drzewa? Mieszanka pocisków minus żołędzie minus orzechy makadamia. Jeżeli wszystkie gatunki gryzoni, które zamieszkują w koronie drzewa, preferują różne rodzaje orzechów, możesz się

przekonać, kto żeruje na tym drzewie, pod warunkiem że wiesz, co kto lubi jeść.



ILUSTRACJA 6.3. Widmo pokazujące absorpcyjne linie Balmera. Widmo promieniowania gwiazdy typu A zarejestrowane przez Sloan Digital Sky Survey (Cyfrowy Przegląd Nieba Sloana), ukazujące absorpcyjne linie Balmera: Hα, Hβ, Hγ i kolejne. Linie zbiegają się przy krótkofalowej granicy serii Balmera. Okienko w prawym górnym rogu to powiększenie fragmentu widma pokazujące kolejne linie aż do H10 (zgodnie z konwencją powyżej Hε stosowane są liczby zamiast greckich liter). Widoczna jest także jedna linia pojedynczo zjonizowanego wapnia (oznaczona: Ca)

Credit: Sloan Digital Sky Survey oraz Michael A. Strauss

Dokładnie taki problem mamy w astrofizyce. Nie możemy zbadać gwiazdy z bliska (zresztą nikt nie chciałby tam się znaleźć — jest za gorąco), więc badamy i analizujemy ją z odległości, obserwując jej światło i sprawdzając, czego brakuje w gładkim, ciągłym widmie termicznym. Badamy widmo i sprawdzamy, czy pasują linie wodoru. Zazwyczaj pasują, ale w atmosferze gwiazdy są także inne pierwiastki. Idź do laboratorium, sprawdź wapń, sprawdź, jaką częstotliwość różne pierwiastki absorbują w warunkach laboratoryjnych. Po kolei sprawdzaj każdy pierwiastek, czy pasuje do widma gwiazdy. Każdy pierwiastek zostawia inny ślad, jednoznaczny jak odcisk palca. Każdy pierwiastek i każda molekuła ma inny układ poziomów energii widocznych na diagramach energii (dla przykładu na il. 6.3 wśród linii wodoru widoczna jest linia absorpcyjna wapnia, oznaczona jako Ca).

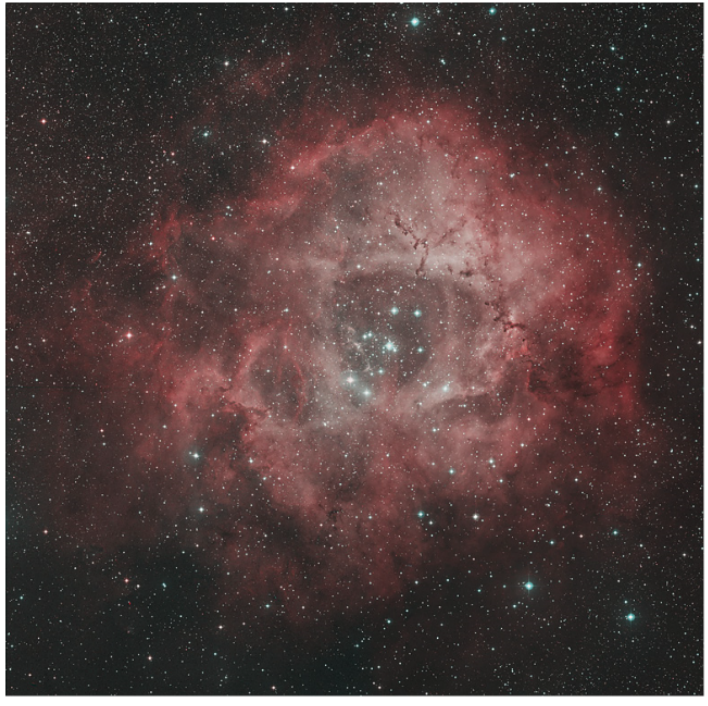
W ogólnym przypadku musimy oprócz widma gwiazd rozważyć także obłok międzygwiezdnego gazu, chmurę wodoru, przez którą przechodzi promieniowanie gorącej, niedaleko położonej gwiazdy. Światło gwiazdy wnika w obłok i przechodzi na drugą stronę, więc w widmie będą obecne linie absorpcyjne. Musimy teraz zrobić bilans linii widmowych. Dla pewnych długości fali światło jest absorbowane, przenosząc elektrony na wyższe poziomy energii. Te elektrony niebawem spadną w dół, emitując przy tym fotony. Jest to pewnego rodzaju chwilowa afera, w którą zamieszany jest elektron i foton. Gdy elektron powróci na pierwotny poziom, zostanie wyemitowany foton (o takiej samej częstotliwości jak foton, który chwilę wcześniej został pochłonięty przez elektron), ale w przypadkowym kierunku.

To odpowiadałoby sytuacji, w której wiewiórki rude i wiewiórki szare mają problemy żołądkowe i natychmiast wypluwają połknięte orzechy w przypadkowych kierunkach. Jeżeli obłok gazu jest w równowadze termicznej, w której średnia liczba elektronów na poziomie 2 nie zmienia się w czasie, to liczba orzechów połkniętych musi być równa liczbie wyplutych. Jeżeli stoisz na linii strzału armaty (obserwacja obłoku wzdłuż linii obserwacji gwiazdy), będziesz widział intensywną wiązkę orzechów z armaty, lecącą w twoim kierunku, minus żołędzie i orzechy makadamia. Jeżeli jednak nie stoisz na linii strzału armaty (obserwacja obłoku nie w linii obserwacji gwiazdy), nie zobaczysz wiązki orzechów z armaty. Patrząc wprost na drzewo (na obłok gazu), zobaczysz żołędzie i orzechy makadamia wylatujące z drzewa. Będą to jasne linie emisyjne, o tych samych długościach fali, które zostały uprzednio zaabsorbowane. Na podstawie obecności żołędzi i orzechów makadamia w wiązce orzechów wylatującej pod kątem z drzewa, możesz wywnioskować, że w koronie drzewa są wiewiórki rude i wiewiórki szare. Przez analogię linie emisyjne widoczne w emitowanym promieniowaniu pozwolą zidentyfikować niektóre pierwiastki obecne w obłoku. Widoczna na ilustracji 6.4 mgławica Rozeta ma wyraźny czerwony kolor. Gaz emituje światło o długości fali 6563 angstremów (linia emisyjna wodoru Hα), co oznacza, że mgławica Rozeta zawiera wodór. Astronomowie potrafią robić doskonałe zdjęcia emisyjnych mgławic, takich jak mgławica Rozeta, wykorzystując filtry, które przepuszczają tylko światło o długości fali Hα. Dzięki temu niemal całe światło ziemskiej atmosfery — które mogłoby popsuć zdjęcie — zostało zablokowane. Światło pochodzące od młodych, jasnych, niebieskich gwiazd, widocznych na ilustracji w centrum mgławicy Rozeta, natrafia na atomy wodoru w mgławicy i przenosi ich elektrony na poziom $n = 3$. Gdy elektrony spadają na poziom $n = 2$, emitują we wszystkie strony fotony Hα. Mgławica świeci czerwonym światłem Hα, podobnie jak uliczny neon świeci na pomarańczowo.

Omawialiśmy rodzinę linii spektralnych wodoru: Hα, Hβ, Hγ, Hδ, Hε i tak dalej, zwaną serią Balmera. Ta seria linii została odkryta w 1885 roku przez Johanna Jakoba Balmera [15]. Nie ma znaczenia, czy strzałki na diagramie energii na ilustracji 6.2 są skierowane w górę czy w dół — taki sam foton jest emitowany (strzałka w dół) lub absorbowany (strzałka w górę), lecz dla wszystkich przejść w serii Balmera pierwszy stan wzbudzony, $n = 2$, jest podstawą, a wszystkie fotony mieszczą się w widzialnej części widma (il. 6.2 przedstawia emisję fotonów oraz towarzyszące emisji przejścia elektronów do stanu $n = 2$). Seria Balmera została odkryta pierwsza, ponieważ fotony Balmera są w widzialnym regionie widma. Ale istnieją także inne serie widmowe wodoru. Dla jednej z nich, serii Paschena, podstawą jest poziom $n = 3$. Przejścia elektronowe w serii Paschena są krótsze w skali energii, więc odpowiadające im fotony mają niższą energię niż światło widzialne (zob. il. 6.2). Seria Paschena leży w całości w podczerwieni. Została zidentyfikowana, gdy zostały wynalezione dobre, skuteczne detektory podczerwieni. Powinieneś wiedzieć, że jest więcej takich rodzin, ale wspomnę tylko trzy: Paschena, Balmera oraz serię Lymana (tak jak poprzednio greckie litery stanowią podstawę nomenklatury: Lyman-alfa, Lyman-beta etc.). Dla serii

Lymana podstawą jest poziom $n = 1$, a wszystkie przejścia są w ultrafiolecie. Przejście o najmniejszej energii w serii Lymana ma większą energię od przejścia o największej energii w serii Balmera (ponownie zob. il. 6.2).

Oznacza to, że gdy szukasz tych przejść w widmie, seria Balmera jest oddzielona od innych serii, seria Lymana jest oddzielona od innych serii, i podobnie seria Paschena, co powoduje, że łatwo je wyizolować i zrozumieć. Mógłbym wybrać i narysować widmo atomu, dla którego tak nie jest. Mógłbym znaleźć atom — niektóre z nich mają bardzo dziwne widma — dla którego przejścia w serii Lymana, Balmera i Paschena są podobne i wszystkie trzy rodziny nakładają się w widmie. Musimy brać pod uwagę takie sytuacje, gdy analizujemy linie widmowe, aby znaleźć i zidentyfikować odpowiadające im pierwiastki.



ILUSTRACJA 6.4. Mgławica Rozeta. Obłok gazu, w którym powstają nowe gwiazdy. Czerwony kolor pochodzi od przejścia od poziomu $n = 3$ do poziomu $n = 2$ w wodorze (Hα)

Credit: Robert J. Vanderbei

Przez tysiące lat umieliśmy tylko mierzyć jasność gwiazd, ich położenie na niebie i może jeszcze kolor. To była domena klasycznej astronomii.

Nowoczesna astrofizyka zaczęła się w momencie, gdy nauczyliśmy się rejestrować widma gwiazd, ponieważ widma pozwalają poznać skład chemiczny. Interpretację widm zawdzięczamy mechanice kwantowej. Chciałbym bardzo wyraźnie to podkreślić. Nie rozumieliśmy widm, zanim nie powstała mechanika kwantowa. Planck wprowadził swoją stałą w 1900 roku, a w 1913 Bohr stworzył model atomu wodoru, z elektronem na orbitalach, co umożliwiło wyjaśnienie serii Balmera. Nowoczesna astrofizyka zaczęła się dopiero wtedy, w latach dwudziestych XX wieku. Zwróć uwagę, że od tego czasu upłynęło zaledwie sto lat. Najstarsi żyjący obecnie ludzie urodzili się, gdy astrofizyka dopiero raczkowała. Przez tysiące lat nie mieliśmy pojęcia, czym są gwiazdy, a w ciągu jednego ludzkiego życia zdołaliśmy je całkiem dobrze poznać. Mam książkę o astronomii z 1900 roku. Są tam takie sformułowania, jak: „tu jest konstelacja", „oto piękna gwiazda", „tu jest wiele gwiazd", „a tu jest mniej gwiazd". Jest cały rozdział o fazach Księżyca, jest rozdział o zaćmieniu Księżyca — to wszystko, co ówcześni astronomowie mieli do powiedzenia. Natomiast podręczniki pisane trzydzieści lat później omawiały skład chemiczny Słońca, źródła energii jądrowej, los Wszechświata. W 1926 roku Edwin Hubble udowodnił, że Wszechświat jest większy, niż ktokolwiek mógł podejrzewać, ponieważ odkrył galaktyki leżące znacznie dalej niż gwiazdy naszej własnej Drogi Mlecznej. A w 1929 roku odkrył, że Wszechświat się rozszerza[16]. Żyją jeszcze ludzie, którzy byli już na świecie, gdy w naszym zrozumieniu Wszechświata poczyniliśmy te milowe kroki. Z jednej strony to niewątpliwie wyjątkowa sytuacja, z drugiej strony często zadaję sobie pytanie: jakie rewolucje czekają na nas w ciągu kilku kolejnych dekad? Jakich kosmicznych odkryć dokona twoje pokolenie? O czym będziesz mógł opowiadać swoim potomkom?

Mając w pamięci takie lekcje historii, może unikniesz takich niemądrych przewidywań, jakie poczynił francuski filozof, Auguste Comte, który w 1842 roku w swojej książce *Cours de philosophie positive* sformułował następującą opinię na temat gwiazd: „Nigdy nie poznamy ich składu chemicznego ani ich mineralogicznej struktury".

---

1 Technicznie rzecz biorąc, megabajt jest równy 2^{20} = 1 048 576 bajtów, a gigabajt jest równy 2^{30} = 1 073 741 824 bajtów, ale w praktyce zaokrąglamy te liczby do miliona i do miliarda.

2 „Ponad 99 miliardów zaserwowanych" (amerykański „billion" = europejski miliard).

3 Autor powiela sposób, w jaki podobne relacje opisywano w XVII wieku. Współczesny zapis trzeciego prawa Keplera, który uwzględnia kwestie wymiarowe, wygląda następująco: $\frac{G(M+m)}{4\pi^2}P^2 = a^3$.

4 Stałość prędkości polowej, czyli zachowanie momentu pędu, wynika z samej tylko sferycznej symetrii pola grawitacyjnego.

5 Na długo przed nim Grecy. Arystoteles pisał: „A zatem ciało albo będzie się znajdować w spoczynku, albo będzie się poruszało w nieskończoność, jeżeli tylko nie stanie mu na drodze jakieś inne silniejsze ciało" (*Fizyka*, przeł. Kazimierz Leśniak, PWN, Warszawa 1968, księga IV, 215a).

6 „Byłem w najbardziej stosownym wieku dla wynalazków i rozmyślałem o Matematyce i Filozofii bardziej niż kiedykolwiek od" [mojej] dedukcji „z reguły Keplera dla periodycznych okresów Planet będących w proporcji trzy do dwóch do ich odległości od środków ich Orbit", że „siły, które trzymają Planety na ich Orbitach muszą [być] odwrotne do kwadratów ich odległości

od centrów, wokół których krążą". Określenie „Mathematicks & Philosophy" w XVII/XVIII wieku oznaczało „matematyka i filozofia przyrody", czyli w dzisiejszym języku „matematyka i fizyka". Sformułowanie „sesquialterate proportion" odnosi się do proporcji wykładników (3 do 2) w trzecim prawie Keplera, $P^2 = a^3$, opisanym na s. 42.

7 D.T. Whiteside, *The Prehistory of the 'Principia' from 1664 to 1686*, „Notes and Records of the Royal Society of London", 45, no. 1 (January 1991), s. 38.

8 Proxima powoli krąży wokół silnie związanych, ciężkich i bliskich sobie pozostałych dwóch gwiazd, z okresem obiegu około 1/2 miliona lat. Zatem informacja, że jest najbliższa Słońcu, z czasem zapewne się zdezaktualizuje.

9 W polskiej literaturze wyróżnia się niekiedy zakres „promieniowanie kosmiczne" powyżej zakresu gamma oraz „prądy wolnozmienne" poniżej zakresu radiowego.

10 Czyli sumaryczną energię (w jednostce czasu) fotonów, których długość fali mieści się w zakresie jednej jednostki długości.

11 Dwieście lat przed erą Plancka.

12 Powinno być: C = 2,898 milimetra razy kelwin.

13 W terminologii astronomicznej funkcjonują dwa pojęcia dotyczące jasności gwiazd: (1) moc promieniowania (ang. *luminosity*) — całkowita ilość energii, jaką gwiazda emituje w pełny kąt bryłowy (we wszystkie strony) w jednostce czasu, czyli całkowita moc gwiazdy. Słowo *luminosity* jest niekiedy zastępowane przez równoważne określenie *intrinsic brightness*. W języku polskim *luminosity* jest tłumaczone jako: „moc" lub „jasność absolutna" albo „dzielność promieniowania" (funkcjonuje także pokrewne określenie „absolutna wielkość gwiazdowa"); (2) jasność obserwowana (ang. *brightness*) — jest to ilość energii, którą w jednostce czasu rejestruje teleskop o aperturze 1 metra kwadratowego. Zatem gwiazda emituje pełną moc (*luminosity*) we wszystkie strony, natomiast teleskop rejestruje tylko maleńki ułamek całkowitej mocy gwiazdy przypadający na kąt bryłowy obejmujący jednostkę powierzchni w miejscu położenia teleskopu na Ziemi. Określenie *brightness* jest tłumaczone jako „jasność obserwowana". W dalszej części książki stosowane będą także określenia: „jasność", „jasna gwiazda", „najjaśniejsza gwiazda" itp., jeżeli z kontekstu jasno wynika, że są użyte w powyższym znaczeniu.

14 Nie jest to cała uwalniana energia, ponieważ gwiazda emituje także cząstki masywne (głównie protony), które prędkości światła nie osiągają, a też unoszą energię.

15 Balmer odkrył wzór Balmera, natomiast same linie spektralne wodoru były znane wcześniej.

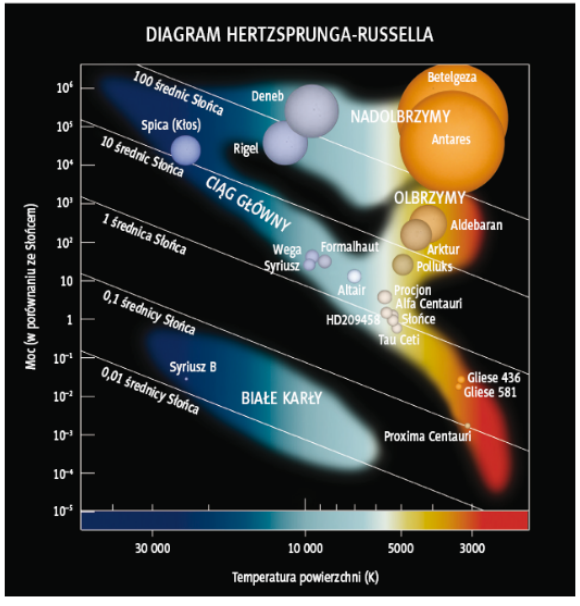
16 Najnowsze badania historyczne znacznie ograniczają rolę Hubble'a w tej dziedzinie i wskazują na zasługi Lemaître'a i innych.

7 – Życie i śmierć gwiazd (I)

Neil deGrasse Tyson

Dwaj astronomowie, Henry Norris Russell i Ejnar Hertzsprung, niezależnie od siebie wpadli na pomysł, aby dla wszystkich znanych gwiazd sporządzić wykres mocy w zależności od koloru. Ten wykres jest obecnie znany jako diagram Hertzsprunga-Russella — w skrócie diagram HR (zob. il. 7.1). Kolory gwiazd możemy klasyfikować liczbowo, jeżeli znamy ich widma. Obecnie wiemy — wiedzieli to także Russell i Hertzsprung — że kolor jest funkcją temperatury (poprzez wzór Plancka). Pionowa współrzędna na diagramie HR pokazuje moc, pozioma kolor lub temperaturę. Najgorętsze (niebieskie) gwiazdy są po lewej, najzimniejsze (czerwone) po prawej.

Henry Norris Russell kierował wydziałem astrofizyki na Uniwersytecie Princeton. Według wszelkich reguł był pierwszym amerykańskim astrofizykiem. Na jego pierwszym diagramie temperatura rośnie w lewo i ta konwencja utrzymuje się do dzisiaj. Russell dysponował obserwacjami i danymi na temat wielu tysięcy gwiazd, uzyskanymi głównie przez kobiety pracujące w Harvard College Observatory. Wykonywały one zadania, które mężczyźni uważali za prace pomocnicze, polegające na klasyfikowaniu widm gwiazd. Były to czasy, gdy osoby zajmujące się obliczeniami nazywano komputerami. Ludzie byli komputerami. Kobiety wykonujące tę pracę były wszystkie zgromadzone w jednym pomieszczeniu. W owych czasach, w początkach XX wieku, kobiety nie mogły być profesorami i nie miały dostępu do zajęć, które mężczyźni rezerwowali dla siebie. Lecz w tym pomieszczeniu dla „komputerów" było kilka zdolnych, zmotywowanych kobiet, które na podstawie analizy widm potrafiły wydedukować kilka istotnych cech Wszechświata, cech, które poznasz w kolejnych rozdziałach. Zatrudniona tam była Henrietta Leavitt. Cecilia Payne także pracowała nad widmami gwiazd na Harvardzie, będąc przez dekadę asystentką Harlowa Shapleya, zanim została mianowana profesorem. To ona odkryła, że Słońce jest zbudowane głównie z wodoru. Dzięki tej wyjątkowej historii mamy w astronomii fascynujące dziedzictwo dokumentujące udział kobiet we wczesnych odkryciach astrofizyki.



ILUSTRACJA 7.1. Diagram Hertzsprunga-Russella dla gwiazd. Poszczególne gwiazdy są uszeregowane na diagramie według ich mocy i temperatury ich powierzchni. Zgodnie z konwencją temperatura powierzchni maleje w prawo. Gwiazdy o niższej temperaturze powierzchni są czerwone, cieplejsze gwiazdy są niebieskie, po lewej stronie wykresu. Cieniowanie wskazuje, gdzie jest większość gwiazd. Wszystkie gwiazdy leżące wzdłuż jednej z diagonalnych linii mają jednakowe rozmiary

Credit: J. Richard Gott, Robert J. Vanderbei, *Sizing Up the Universe*, „National Geographic", 2011

Hertzsprung i Russell wyciągnęli z katalogów dane na temat mocy oraz temperatury gwiazd, wstawili je do diagramu i odkryli, że gwiazdy nie zajmują całej powierzchni diagramu. W niektórych obszarach diagramu w ogóle nie ma gwiazd — to są te puste miejsca na ilustracji — natomiast w innych gwiazdy grupują się wzdłuż ukośnych linii. Przez środek diagramu biegnie rzucająca się w oczy sekwencja gwiazd. Hertzsprung i Russell nazwali ją ciągiem głównym, zgodnie z panującą w tej dziedzinie zasadą, aby nadawać najprostsze możliwe nazwy.

Dziewięćdziesiąt procent skatalogowanych gwiazd znajduje się w tej strefie. Natomiast w prawym górnym rogu jest grupka gwiazd o względnie niskiej temperaturze, lecz o bardzo dużej mocy. Jeżeli ich temperatura jest niska, to jakiego są koloru? Wiadomo, czerwonego. Jeżeli ich temperatura jest niska, to jakim cudem mają dużą moc? Muszą być duże. I rzeczywiście, to są duże, czerwone gwiazdy. Nazywamy je czerwonymi olbrzymami. Znając i rozumiejąc funkcję Plancka, wiemy, że muszą być czerwone i muszą być duże. Oto potęga dedukcji. Jeszcze wyżej w prawym górnym rogu znajdują się czerwone nadolbrzymy. Mając w pamięci niedawno poznane prawa fizyki, wkroczymy teraz na nową astronomiczną arenę i przeanalizujemy całą sytuację. W istocie, korzystając z prawa Stefana-Boltzmanna i znając promień r gwiazdy, możemy obliczyć jej moc ($L = 4\pi r^2 \sigma T^4$) i możemy narysować na diagramie diagonalne linie stałego promienia: 0,01 średnicy Słońca; 0,1 średnicy Słońca; 1 średnica Słońca; 10 średnic Słońca; 100 średnic Słońca[1]. Wiemy teraz, jak duże są te gwiazdy. Słońce leży oczywiście na linii oznaczonej jako 1 średnica Słońca. Czerwone nadolbrzymy są większe niż 100 średnic Słońca. Poniżej ciągu głównego znajduje się inna grupa gwiazd. Są na tyle

gorące, że mają kolor zbliżony do białego. Są niezwykle słabe, więc muszą być małe. Nazywamy je białymi karłami (ang. *white dwarfs*). Niektórzy Brytyjczycy (np. J.R.R. Tolkien) preferują formę *dwarves*, lecz Amerykanie trzymają się formy *dwarfs*. Nie tylko astronomowie. Tytuł znanego filmu Disneya z 1937 roku *Królewna Śnieżka i siedmiu krasnoludków* brzmi w oryginale *Snow White and the Seven Dwarfs*, a nie *Seven Dwarves*.

Gdy diagram HR został opublikowany, nie wiedzieliśmy, dlaczego sklasyfikowane w ten sposób gwiazdy grupują się w strefy. Może gwiazda rodzi się z dużą mocą i z upływem czasu staje się stopniowo coraz słabsza, aż w końcu umiera z niską mocą i niską temperaturą. Może ślizga się wzdłuż ciągu głównego, równocześnie schładzając się i tracąc z wiekiem moc. Rozsądne przypuszczenie, ale to rozumowanie prowadziło do oszacowania wieku Słońca na około biliona lat, znacznie więcej niż wynosi wiek Ziemi. Przez kilkanaście lat proponowano rozmaite sposoby wyjaśnienia tej sprzeczności, zanim doszliśmy, jaka jest prawda. A zaczęło się od obserwacji zupełnie innych obiektów na niebie.

Dwa zdjęcia (il. 7.2 i 7.3) ukazują zgrupowania gwiazd, zwane oficjalnie gromadami gwiazd. Niektóre liczą kilkaset gwiazd, inne setki tysięcy. Jeżeli gromada liczy tylko kilkaset gwiazd (jak Plejady na il. 7.2), nazywamy ją gromadą otwartą, jeżeli liczy setki tysięcy gwiazd, zazwyczaj ma sferyczny kształt, jak M13 (il. 7.3), a nazywamy ją gromadą kulistą.



ILUSTRACJA 7.2. Plejady, otwarta gromada gwiazd. Młoda gromada, prawdopodobnie licząca mniej niż 100 milionów lat

Photo credit: Robert J. Vanderbei

Gromady kuliste miewają po kilkaset tysięcy gwiazd, gromady otwarte do tysiąca. Gdy widzisz na niebie gromadę, od razu wiesz, z którym przypadkiem masz do czynienia. Nie ma dyskusji, ponieważ nie ma pośrednich sytuacji: albo gromada ma niewiele gwiazd, albo bardzo wiele. Wszystkie gwiazdy w danej gromadzie mają jednakową datę urodzin — powstały równocześnie z jednego obłoku gazu.

Plejady to młoda gromada — coś jakby gwiezdne przedszkole. Na zdjęciu dominują młode, jasne, niebieskie gwiazdy. Diagram HR dla tej gromady wskazuje ciąg główny i żadnych czerwonych olbrzymów. Niebieskie gwiazdy

na szczycie ciągu głównego są tak jasne, że dominują, ale są także obecne czerwone gwiazdy u dołu ciągu głównego. Plejady pokazują, jak wygląda układ gwiazd niedługo po narodzinach. Widzimy, że niektóre gwiazdy rodzą się z wysoką mocą i wysoką temperaturą, inne z niską mocą i niską temperaturą — po prostu takie, a nie inne się rodzą — na całej długości ciągu głównego.

Gromady kuliste, takie jak M13, zawierają gwiazdy ciągu głównego, minus górny koniec, plus trochę czerwonych olbrzymów, które nie należą do ciągu głównego. Gromada M13 na ilustracji 7.3 przypomina zdjęcie ze spotkania z okazji pięćdziesięciolecia matury — wszystkie gwiazdy są stare. Czerwone olbrzymy są najjaśniejsze i dominują na niebie. Ciąg główny w M13 nadal zawiera gwiazdy o niskiej mocy i niskiej temperaturze, ale gdzie się podziały jasne, niebieskie gwiazdy? Zeszły ze sceny? Co się stało? Możesz odgadnąć, dokąd „poszły": zostały czerwonymi olbrzymami. Górny koniec ciągu głównego uwiądł, gdy jasne gwiazdy stały się czerwonymi olbrzymami.



ILUSTRACJA 7.3. Gromada kulista M13

Photo credit: J. Richard Gott, Robert J. Vanderbei, *Sizing Up the Universe*, „National Geographic", 2011

Znaleźliśmy także gromady w średnim wieku, dla których zniknęła jedynie część górnego końca ciągu głównego i pojawiło się tylko trochę czerwonych olbrzymów.

Aby odgadnąć masy różnych typów gwiazd, musieliśmy wykazać się sprytem. Mierzyliśmy przesunięcia Dopplera w liniach widmowych gwiazd podwójnych, które krążą wokół siebie (wokół wspólnego środka masy), a następnie zastosowaliśmy Newtonowskie prawo grawitacji. W ten sposób odkryliśmy, że ciąg główny jest zarazem ciągiem mas, od masywnych, jasnych,

niebieskich gwiazd w lewym górnym końcu, do lekkich, niezbyt jasnych, czerwonych gwiazd w prawym dolnym rogu. Lekkie gwiazdy rodzą się z niską mocą i niską temperaturą, ciężkie gwiazdy rodzą się z wysoką mocą i wysoką temperaturą.

Masywne, niebieskie gwiazdy w górnym końcu ciągu głównego żyją około 10 milionów lat. Jak na gwiazdę to niewiele. Gwiazda podobna do Słońca, położona w okolicy środka ciągu głównego, żyje około 10 miliardów lat, czyli tysiąc razy dłużej. Czerwone gwiazdy o niskiej mocy, położone w dolnym końcu ciągu głównego, powinny żyć biliony lat. Około 90% gwiazd znajduje się na ciągu głównym. Dlaczego? Okazuje się, że gwiazdy spędzają 90% swojego życia z taką mocą i taką temperaturą, które sytuują je na ciągu głównym. Pomyśl o tym w taki sposób: wiem — a raczej jestem pewien — że codziennie myjesz zęby w łazience. Jeżeli będę cię fotografował w losowych momentach w ciągu dnia, to nieczęsto trafi się zdjęcie, na którym myjesz zęby. Wprawdzie codziennie myjesz zęby, ale jednak poświęcasz temu zajęciu niewiele czasu w porównaniu z resztą dnia. Zrozumieliśmy, że gwiazdy „przechodzą" przez niektóre pustawe obszary diagramu HR, gdy ich moc i temperatura się zmienia, lecz robią to tak szybko (krótko przebywają w tych obszarach), że do rzadkości należą przypadki, gdy przyłapujemy gwiazdę na myciu zębów.

Co się dzieje w środku gwiazdy? Wiemy, że gdy wzrasta temperatura, cząstki poruszają się szybciej. Wiemy, że 90% jąder atomowych we Wszechświecie to jądra wodoru i podobne proporcje są w gwiazdach. Weźmy obłok gazu, który w 90% składa się z wodoru. To jeszcze nie gwiazda, ale gdy się zapadnie, powstanie nowa gwiazda. Jak łatwo odgadnąć, środek jest najgorętszą częścią gwiazdy. Gdy coś ściskasz, to się nagrzewa. Środki gwiazd są tak gorące, że (jak się przekonamy) stają się jądrowymi tyglami utrzymującymi wysoką temperaturę wnętrza. Powierzchnia gwiazdy jest znacznie chłodniejsza, natomiast środek jest tak gorący, że atomy zostają pozbawione wszystkich elektronów i pozostają same jądra.

Jądro wodoru zawiera jeden proton. Gdy zbliża się do niego inny proton, odpychają się wzajemnie. Protony są dodatnio naładowane, a ładunki jednakowego znaku się odpychają z siłą proporcjonalną do $1/r^2$, więc im bliżej się znajdują, tym mocniej się odpychają. Jeżeli jednak zwiększymy temperaturę, zwiększy się średnia energia kinetyczna cząstek, czyli wzrośnie prędkość protonów. Większa prędkość oznacza, że protony mogą się zbliżać na mniejszą odległość, zanim siły elektrostatyczne zmuszą je do zawrócenia. Okazuje się, że istnieje pewna magiczna temperatura — około 10 milionów kelwinów — w której dwa protony mogą się znaleźć tak blisko, że całkiem nowa, krótkozasięgowa siła (tzw. oddziaływanie silne) może przezwyciężyć odpychanie, przyciągając protony i wiążąc je, jak wspomniałem w rozdziale 1. Ta przyciągająca siła jądrowa, nieznana nam jeszcze sto lat temu, jest na tyle duża, że potrafi przezwyciężyć elektrostatyczne odpychanie protonów. Jaka nazwa byłaby lepsza niż silne oddziaływanie jądrowe? Jest ono odpowiedzialne za zjawisko zwane obecnie fuzją termojądrową. silne oddziaływanie jądrowe jest także odpowiedzialne za wiązania cięższych jąder. Jądro helu ma dwa protony i dwa neutrony. Protony odpychają się

elektrostatycznie, lecz siły jądrowe trzymają je wewnątrz jądra. Podobnie jest z jądrem węgla (sześć protonów i sześć neutronów) oraz tlenu (osiem protonów i osiem neutronów).

Gdy dwa protony się zbliżają w temperaturze 10 milionów kelwinów, zachodzi interesująca reakcja jądrowa, w wyniku której proton i neutron zostają związane w nowo powstałym jądrze — jeden z protonów spontanicznie zamienił się w neutron — a dodatnio naładowany elektron, zwany pozytonem, zostaje równocześnie wyemitowany. Pozyton jest składnikiem egzotycznego stanu materii, zwanego antymaterią. Pozyton ma taką samą masę jak elektron. Gdy się spotkają, anihilują, zamieniając całą łączną masę w energię unoszoną przez dwa fotony, zgodnie z Einsteinowskim równaniem $E = mc^2$, o którym Rich będzie miał znacznie więcej do powiedzenia w rozdziale 18. Emitowane jest także neutrino elektronowe — neutralna (zero ładunku elektrycznego) cząstka, która tak słabo oddziałuje z innymi cząstkami, że szybko ucieka ze Słońca. Zwróć uwagę, że w tej reakcji zachowany jest ładunek. Zaczynamy z dwoma dodatnimi ładunkami (po jednym na każdym protonie) i kończymy z dwoma (jeden na protonie i jeden na pozytonie). Reakcja jest źródłem energii, ponieważ suma masy cząstek przed reakcją jest większa od sumy masy cząstek po reakcji. Nadwyżkowa masa zostaje zamieniona w energię via $E = mc^2$. Czym (jakim jądrem) jest układ związany protonu i neutronu? Ma jeden proton, więc nadal jest wodorem, lecz jest to cięższa wersja wodoru. Nazywamy je ciężkim wodorem, lecz ma także własną nazwę: deuter.

Mam teraz trochę deuteru. Deuter plus kolejny proton daje jądro ppn (dwa protony i jeden neutron) plus więcej energii. Czym jest ten układ związany? Mam teraz dwa protony w jądrze, a gdy mamy dwa protony, to mamy hel. Słowo „hel" pochodzi od Heliosa — greckiego boga Słońca — ponieważ ten pierwiastek został odkryty w Słońcu dzięki analizie spektralnej, zanim odkryliśmy go na Ziemi. Jądro ppn jest lżejszą wersją normalnego helu, zwaną helem-3, ponieważ ma trzy nukleony (dwa protony i jeden neutron). Teraz zderzymy dwa jądra helu-3: ppn + ppn = ppnn + p + p + więcej energii. Jądro ppnn jest to bardziej rozpowszechniona, zwykła wersja helu — hel-4 (balony helowe są napełniane helem-4).

To wszystko odbywa się w temperaturze 15 milionów kelwinów w centrum Słońca, które w każdej sekundzie zamienia 4 miliony ton materii w energię. Gwiazdy ciągu głównego zamieniają wodór w hel. Gdy w końcu zabraknie wodoru, niebo szaleje: gwiazda się rozszerza i staje się czerwonym olbrzymem. Za prawie 5 miliardów lat nasze Słońce stanie się czerwonym olbrzymem, odrzuci zewnętrzne powłoki, a następnie ustatkuje się jako biały karzeł. Cięższe gwiazdy staną się czerwonymi olbrzymami lub nadolbrzymami. Mogą wybuchnąć jako supernowe, a ich rdzenie zapadną się, tworząc gwiazdy neutronowe lub czarne dziury. Wrócimy do tego tematu w rozdziale 8.

Powróćmy jeszcze do diagramu HR. Mamy ciąg główny, czerwone olbrzymy, białe karły; temperatura rośnie w lewo, a moc rośnie w górę wykresu. Gwiazdy są podzielone na typy, zgodnie ze spektralną klasyfikacją pochodzącą

od przedkwantowego schematu, w którym stosowane były litery alfabetu. Ten system jest nadal w użyciu: OBAFGKMLTY. Każda litera oznacza typ widmowy gwiazd w zależności od temperatury powierzchni; Słońce jest gwiazdą typu G. Przybliżona temperatura powierzchni oraz kolor są następujące:

O (> 33 000 K, niebieski),
B (10 000-33 000 K, białoniebieski),
A (7500-10 000 K, biały lub białoniebieski),
F (6000-7500 K, biały),
G (5200-6000 K, biały),
K (3700-5200 K, pomarańczowy),
M (2000-3700 K, czerwony).

Wszystkie powyższe kategorie są na ilustracji 7.1. Pozostałe typy znajdują się poza ilustracją na prawo: L (1300-2000 K, czerwony), T (700-1300 K, czerwony) oraz Y (< 700 K, czerwony). Jeżeli porównasz skalę temperatury u dołu wykresu, możesz łatwo sprawdzić, do którego typu należy dana gwiazda. Spica (Kłos) jest gwiazdą typu B, Syriusz typu A, Procjon typu F, a Gliese 581 typu M. Dla każdej gwiazdy na poziomej osi można odczytać temperaturę (cieplejsze w lewo, zimniejsze w prawo), a na osi pionowej moc (rośnie od dołu w górę). Jak widać, moc Słońca wynosi oczywiście jeden, gdyż pionowa oś jest wyskalowana w jednostkach równych mocy Słońca (ang. *solar luminosity*). Skala na pionowej osi jest logarytmiczna, co pozwala zmieścić na wykresie ogromny zakres obserwowanych wartości, gdyż każda kolejna kreska na osi reprezentuje gwiazdę o dziesięć razy większej mocy.

Wzdłuż górnej krawędzi ilustracji 7.1 leżą gwiazdy o mocach milion razy większych od mocy Słońca. Wzdłuż dolnej krawędzi leżą gwiazdy sto tysięcy razy słabsze od Słońca. Rozpiętość na skali mocy gwiazd ciągu głównego jest oszałamiająca. Przekonamy się, że gwiazdy na górnym końcu ciągu głównego są tylko około sześćdziesięciu razy cięższe od Słońca, a nie milion razy. Gwiazdy w dolnym końcu są tylko dziesięć razy lżejsze od Słońca, ale — jak wspomniałem wyżej — są znacznie słabsze od Słońca. Rozpiętość ich masy jest duża, ale nieporównywalnie mniejsza od rozpiętości na skali mocy. Znamy zależność mocy od masy dla gwiazd ciągu głównego: moc jest proporcjonalna do masy podniesionej do potęgi 3,5. To silnie nieliniowa zależność, co tłumaczy fakt, że dwie gwiazdy o nieznacznie innej masie mogą się znacznie różnić pod względem mocy.

A oto prosty rachunek. Zacznij od $E = mc^2$. To jeden z pierwszych wzorów, jakie każdy z nas poznaje w szkole, zapewne gdzieś w okolicy trzeciej klasy. Widziałeś ten wzór, zanim w ogóle wiedziałeś, co oznacza. Wiesz, że opublikował go Albert Einstein w jednej ze swoich prac w 1905 roku. Jak już wspomnieliśmy, wzór określa ilość energii, jaka powstaje w wyniku konwersji masy w energię, a ponieważ we wzorze występuje prędkość światła podniesiona do kwadratu, współczynnik konwersji jest naprawdę ogromny. Bomby jądrowe zawdzięczają temu wzorowi swoją moc. W rozdziale 18 Rich

omówi pochodzenie tego wzoru od Einsteinowskiej szczególnej teorii względności.

Jak długo żyje gwiazda o określonej masie i określonej mocy? Na podobnej zasadzie możesz zapytać, jak daleko zajedzie twój samochód, zanim skończy się benzyna w baku. Znając pojemność baku i wiedząc, ile kilometrów przejeżdża na jednym litrze, możesz obliczyć zasięg. Moc gwiazdy to ilość energii emitowanej w jednostce czasu. Jeżeli pomnożysz czas życia gwiazdy l (ang. *lifetime*) przez jej moc L, otrzymasz całkowitą energię, l L, jaką gwiazda wyemituje w ciągu swego życia. Jeżeli znamy moc gwiazdy ciągu głównego (czyli tempo, w jakim spala paliwo) i wiemy, ile ma wodorowego paliwa, to jak długo pozostanie gwiazdą ciągu głównego? Całkowita energia, jaką uzyskasz z gwiazdy spalającej swoje wodorowe paliwo, jest proporcjonalna do jej masy M. Wstawiamy M do wzoru $E = mc^2$. Całkowita energia jest proporcjonalna do M i jest także proporcjonalna do l L, więc masa M jest proporcjonalna do l L, co oznacza, że l jest proporcjonalna do M/L. Jeżeli L jest proporcjonalna do $M^{3,5}$, jak wspomniałem powyżej, to czas życia gwiazdy l jest proporcjonalny do $M/M^{3,5}$, czyli do $1/M^{2,5}$. Im większa masa gwiazdy, tym krótsze będzie jej życie na ciągu głównym!

Zobaczmy, co to oznacza. Jeżeli czas życia gwiazdy jest proporcjonalny do $1/M^{2,5}$, to czas życia gwiazdy o masie cztery razy większej od masy Słońca powinien być $1/4^{2,5}$ razy dłuższy od czasu życia Słońca. Policzmy ułamek $1/4^{2,5}$ — to jest 1 podzielone przez 4 do kwadratu i jeszcze przez pierwiastek z 4. Pierwiastek z 4 wynosi 2, a 4 do kwadratu to 16. Czyli gwiazda o czterokrotnej masie Słońca żyje trzydzieści dwa razy krócej od Słońca. Czas życia Słońca na ciągu głównym wynosi około 10 miliardów lat, więc czterokrotnie cięższa gwiazda spędzi na ciągu głównym tylko 1/32 z 10 miliardów lat, czyli około 300 milionów lat. To niewiele.

Inny przykład: $1/40^{2,5}$ to jest około 1/10 000, więc jeżeli masz gwiazdę czterdzieści razy cięższą od Słońca, to będzie żyła tylko milion lat — to bardzo niewiele w skali bilionów lat. A teraz zróbmy krok w przeciwnym kierunku. Rozważmy gwiazdę o masie równej 1/10 masy Słońca. Jeden podzielone przez 1/10 to jest 10, a 10 podniesione do potęgi 2,5 to około 300. Ta gwiazda będzie żyć trzysta razy dłużej od Słońca. Ile to jest 300 razy 10 miliardów? 3000 miliardów, czyli 3 biliony lat, znacznie więcej niż obecny wiek Wszechświata. Ta gwiazda bardzo oszczędnie gospodaruje swoim paliwem. Gwiazda dziesięć razy cięższa od Słońca żyje trzysta razy krócej od Słońca, a gwiazda dziesięć razy lżejsza od Słońca żyje trzysta razy dłużej od Słońca.

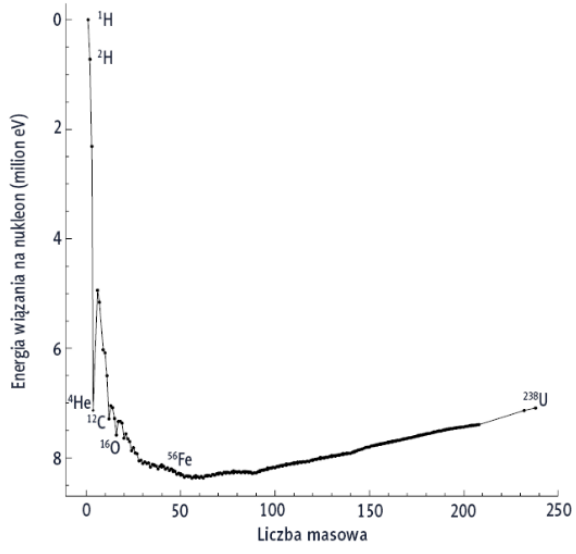
We wnętrzu gwiazdy ciągu głównego wodór zamienia się w hel. W fazie czerwonego olbrzyma zachodzą inne procesy, w wyniku których powstają takie pierwiastki jak węgiel, tlen i kolejne pierwiastki układu okresowego, aż do żelaza (które ma 26 protonów i 30 neutronów). Gwiazda spędzi 90% swojego życia na ciągu głównym, zanim zacznie produkować te cięższe pierwiastki jako czerwony olbrzym. Ta ostatnia faza trwa krótko, zaledwie 10% czasu życia gwiazdy. Za każdym razem, gdy w procesie fuzji łączą się lekkie pierwiastki, z których powstaje pierwiastek cięższy, w ramach reakcji zachodzi zmniejszenie całkowitej masy (pod warunkiem, że końcowym

produktem będzie izotop żelaza Fe-56 lub niklu Ni-62, lub jakiś lżejszy pierwiastek). Reakcja zachodzi zgodnie z wzorem $E = mc^2$, więc różnica mas zamienia się w energię kinetyczną. To jest egzotermiczny proces fuzji (ang. *fusion*), ponieważ uwalniana jest energia. Znamy także inne procesy jądrowe, w których również uwalniana jest energia. Na przykład jądro uranu (numer 92) rozpada się na mniejsze jądra w reakcji, która też jest egzotermiczna. Tak stało się podczas drugiej wojny światowej — bomba zrzucona na Hiroszimę była bombą uranową, bomba zrzucona na Nagasaki była z plutonu (numer 94). Każdy z tych pierwiastków ma ogromne jądro i każdy ma wiele izotopów (wersji tego samego pierwiastka z taką samą liczbą protonów, lecz z różną liczbą neutronów), które są niestabilne. Gdy ulegają rozszczepieniu, uwalniana jest energia. Ta reakcja, zwana reakcją rozszczepienia (ang. *fission*), także jest egzotermiczna. W początkach zimnej wojny większość światowego arsenału jądrowego stanowiły bomby działające na zasadzie rozszczepienia, zwane bombami jądrowymi lub atomowymi (ang. *fission bombs*), natomiast dzisiaj na światowy arsenał jądrowy składają się bomby działające na zasadzie fuzji, zwane bombami termojądrowymi lub wodorowymi (ang. *fusion bombs*). Aby umieścić ich moc w odpowiedniej perspektywie, bomba jądrowa służy jako zapalnik bomby termojądrowej, co ilustruje niszczącą moc broni termojądrowej oraz skuteczność, z jaką zamienia materię w energię. Dokładnie tak samo działają gwiazdy. Słońce jest jedną wielką bombą termojądrową, a jego budząca grozę energia jest zamknięta przez ogromną masę gwiazdy otaczającą jej rdzeń. Nie umiemy jeszcze skonstruować elektrowni termojądrowej (ang. *fusion power plant*), w której energia byłaby uwalniana w kontrolowany sposób. Wszystkie elektrownie jądrowe w Ameryce, Francji i w innych krajach działają dzięki kontrolowanej reakcji jądrowej (ang. *fission power plant*).

Możesz uzyskać energię, rozszczepiając ciężkie pierwiastki albo łącząc (syntetyzując) lekkie, ale tylko do pewnej granicy. Wyjaśnia to ilustracja 7.4. Na osi poziomej odłożona jest liczba masowa, czyli liczba nukleonów (protonów i neutronów) w jądrach kolejnych izotopów. Wykres zaczyna się od wodoru, którego jądro zawiera tylko jeden proton, a kończy się na izotopie 238 uranu, którego jądro zawiera 92 protony i 146 neutronów. Niektóre pierwiastki mają kilka izotopów. Uran-235, którego jądro zawiera 92 protony i 143 neutrony, jest radioaktywny i łatwo rozszczepialny (ten izotop uranu został użyty w bombie zrzuconej na Hiroszimę). Wszystkie pozostałe pierwiastki na wykresie leżą między wodorem i uranem. Na osi pionowej odłożona jest energia wiązania na jeden nukleon. Im większa energia wiązania, tym niżej dany pierwiastek leży na wykresie.

Aby zrozumieć, co to jest energia wiązania, wyobraź sobie dwa magnesy sczepione przeciwnymi biegunami — północny biegun jednego magnesu przylega do południowego bieguna magnesu drugiego. Jeżeli chcesz je rozłączyć (rozszczepić), musisz zainwestować pewną ilość energii. Energia wiązania to właśnie ta ilość energii potrzebna do odsunięcia magnesów na taką odległość, aby przestały się przyciągać. Na ilustracji 7.4 wodór leży na samej górze[2] — energia wiązania wodoru jest równa zeru. Hel leży niżej,

ponieważ w trakcie fuzji wodoru w hel uwalniana jest energia. Energia wiązania helu jest większa od energii wiązania wodoru, więc hel leży na zboczu wąwozu poniżej wodoru. Zwróć uwagę na skalę: energia wiązania jest liczona w milionach elektronowoltów na nukleon (elektronowolt [eV] wprowadziliśmy w rozdziale 6). Aby rozszczepić hel na wodór, trzeba dostarczyć mu energii — ponad 7 milionów elektronowoltów razy 4 nukleony, co daje ponad 28 milionów elektronowoltów. Krzywa na ilustracji 7.4 osiąga minimum w okolicy żelaza, a następnie wspina się do góry, aż dochodzi do uranu na prawym końcu. Pierwiastki położone na lewo od minimum mogą ulegać egzotermicznej fuzji, natomiast pierwiastki położone na prawo od minimum — egzotermicznemu rozszczepianiu. Położenie minimum zajmuje żelazo, które ma 26 protonów i 30 neutronów w jądrze. Jeżeli spróbujesz poddać żelazo fuzji, reakcja będzie endotermiczna — energia będzie absorbowana. Jeżeli spróbujesz rozszczepić jądro żelaza, reakcja także będzie endotermiczna — energia będzie absorbowana. Tak czy owak, zabawa kończy się na żelazie — gdy dojdziesz do żelaza, nie uzyskasz więcej energii.



ILUSTRACJA 7.4. Energia wiązania jąder atomowych, w milionach elektronowoltów, w przeliczeniu na jeden nukleon (proton lub neutron). Uwzględnione są tylko stabilne izotopy. Każdy punkt wykresu reprezentuje energię (na jeden nukleon), jaka zostałaby uwolniona, gdyby dane jądro zostało zbudowane z początkowo swobodnych nukleonów. Im większa energia wiązania (na jeden nukleon), czyli im niżej na wykresie leży dany izotop, tym mniejszą ma masę (w przeliczeniu na jeden nukleon), zgodnie z wzorem Einsteina $E = mc^2$

Credit: Michael A. Strauss, korzystając z danych ze strony http://hal.in2p3.fr/in2p3-00020241/document; G. Audi, O. Bersillon, J. Blachot, A.H. Wapstra, „Nuclear Physics" A 729, 2003, s. 3-128

Gwiazdy są liderami w biznesie energetycznym. Gdy gwiazda zamienia wodór w hel, energia uwalniana w procesie fuzji utrzymuje wysoką temperaturę rdzenia. Termiczne ciśnienie gazu przeciwstawia się grawitacji i powstrzymuje gwiazdę przed zapadnięciem się pod własnym ciężarem. Rozważmy gwiazdę o masie dziesięć razy większej od masy Słońca. W pierwszej fazie gwiazda składa się głównie z wodoru i helu, a w rdzeniu wodór zamienia się w hel. W drugiej fazie w zewnętrznych warstwach są wodór i hel, lecz w rdzeniu jest już tylko hel. Co wtedy się dzieje? Fuzja wodoru w rdzeniu się skończyła, nie ma dostaw energii, rdzeń nie potrafi już powstrzymać ciśnienia i zaczyna się zapadać. Gdy rdzeń się zapada, rośnie jego ciśnienie, ze wzrostem ciśnienia rośnie temperatura, aż zrobi się na tyle gorąco, że zacznie się spalanie (fuzja) helu. Aby doprowadzić do fuzji jąder helu (ppnn + ppnn), trzeba więcej energii niż do fuzji jąder wodoru (p + p), ponieważ jądra helu (ppnn) mają po dwa protony, czyli odpychają się wtedy dwukrotnie większe ładunki elektryczne. W drugiej fazie, gdy temperatura wzrośnie do 100 milionów kelwinów, zaczyna się spalanie (fuzja jąder) helu, które ponownie utrzymuje gwiazdę w stabilnym stanie. W helowym rdzeniu pojawia się węgiel jako produkt fuzji jąder helu, a wokół rdzenia powstaje powłoka, w której nadal trwa spalanie wodoru. Ostatecznie w środku gwiazdy powstaje kula węgla o zbyt niskiej temperaturze, aby zapoczątkować jego fuzję — proces fuzji ustaje. Rdzeń zapadnie się głębiej, wzrośnie ciśnienie, a ze wzrostem ciśnienia wzrośnie temperatura i zacznie się faza trzecia — fuzja węgla. Mamy teraz przemianę węgla w tlen w środku węglowego rdzenia mieszczącego się wewnątrz powłoki helowej znajdującej się wewnątrz otoczki wodorowej. Powstaje cebula. W kolejnych warstwach zachodzi synteza różnych pierwiastków w różnych temperaturach — im głębiej, tym cieplej. Każda reakcja jest źródłem energii. W ostatniej fazie mamy żelazny rdzeń otoczony przez kolejne powłoki coraz lżejszych pierwiastków: m.in. krzemu, magnezu, neonu, tlenu, węgla, helu, wodoru — przyszłe źródło chemicznych zasobów Galaktyki.

Ale na razie wszystkie te pierwiastki są uwięzione wewnątrz gwiazdy. Wiemy, że musiały się jakoś wydostać, ponieważ my sami jesteśmy z nich zbudowani! Gdy w rdzeniu pozostanie samo żelazo, proces syntezy się zakończy i gwiazda się zapadnie. Gdyby próbowała spalać żelazo, musiałaby zassać energię, zapadając się jeszcze szybciej (gwiazdy produkują energię, lecz nie absorbują jej). Gdy rdzeń się zapada, gwiazda imploduje, zostawiając w środku maleńką, supergęstą gwiazdę neutronową. Energia wyzwolona przy tej implozji jest tak duża, że zewnętrzne powłoki zostają odrzucone w tytanicznej eksplozji. Przez kilka tygodni gwiazda świeci miliardy razy jaśniej od Słońca, a jej wnętrzności zostają wyrzucone w galaktyczną przestrzeń, wzbogacając międzygwiezdne, wodorowo-helowe obłoki w paletę ciężkich pierwiastków.

Na ilustracji 7.5 widzimy piękną galaktykę spiralną M51 składającą się ze stu miliardów gwiazd, spalających spokojnie swoje zasoby jądrowego paliwa (górne zdjęcie), aż nagle jedna z nich eksploduje (dolne zdjęcie). Jak zobaczymy w rozdziale 12, żyjemy w spiralnej galaktyce, podobnej do M51. Przed wybuchem (na górnym zdjęciu) widzimy galaktykę M51 oraz na

pierwszym planie kilka gwiazd należących do naszej galaktyki, Drogi Mlecznej. Te gwiazdy są bliżej nas (i oczywiście nie są tak mocne) niż M51. Gdy jedna z jej gwiazd eksploduje, widzimy nagle nową gwiazdę, która wcześniej nie była widoczna, a teraz jest bezspornie najjaśniejszym obiektem w galaktyce M51. Widzimy pojedynczą gwiazdę odległej galaktyki. Jeżeli ta gwiazda miała planety, to zostały z nich skwarki. Całkiem prosto i całkiem dosłownie. Taka eksplodująca gwiazda nazywa się supernowa. Pojawia się niezapowiedziana na niebie i wygląda jak nowa gwiazda — stąd wzięło się określenie *nova*, oznaczające po łacinie „nowa". Dopiero niedawno zrozumieliśmy, że jest odwrotnie — obserwujemy pośmiertne konwulsje gwiazd. Nie wszystkie gwiazdy kończą żywot w tak spektakularny sposób. Tylko gwiazdy o dość dużej masie wybuchają jako supernowe, odrzucając zewnętrzne warstwy i zostawiając po sobie maleńkie, niezwykle gęste gwiazdy neutronowe. Jeszcze cięższe gwiazdy także wybuchają, lecz wzrost grawitacji w pobliżu środka gwiazdy zakrzywia czasoprzestrzeń w takim stopniu, że powstaje czarna dziura, a otoczka gwiazdy zostaje odrzucona w przestrzeń jako supernowa.



ILUSTRACJA 7.5. Galaktyka spiralna M51 oraz supernowa

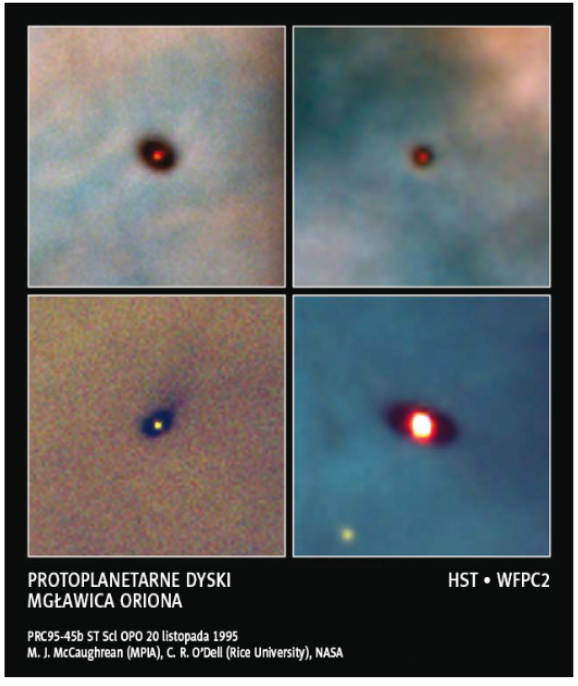
Photo credit: J. Richard Gott, Robert J. Vanderbei, *Sizing Up the Universe*, „National Geografic", 2011

Stephen Hawking dokonał wielu ważnych odkryć dotyczących czarnych dziur i ich dziwacznych zachowań oraz właściwości. W rozdziale 20 Rich będzie miał nieco więcej do powiedzenia na temat czarnych dziur oraz odkryć Hawkinga. W animowanym serialu *Simpsonowie* Stephen Hawking został sportretowany jako najbystrzejsza osoba żyjąca na Ziemi. Większość z nas jest skłonna się z tym zgodzić.

A teraz zajmiemy się narodzinami gwiazd. Mgławica Oriona jest kolebką gwiazd. Jest to obłok gazu wzbogacony przez cięższe pierwiastki powstałe w rdzeniach poprzedniego pokolenia umierających gwiazd.

W środku mgławicy leżą jasne, nowo narodzone gwiazdy typu O i B, promieniujące intensywnie w ultrafiolecie. Fotony gorącego promieniowania UV mają dość energii, aby zjonizować (pozbawić elektronów) atomy wodoru w pobliskich obłokach gazu, utrudniając lub uniemożliwiając im formowanie kolejnych gwiazd. W międzyczasie inne obłoki gazu, wzbogacone cięższymi pierwiastkami, tworzą nieco inne obiekty — twarde kule materii zawierające tlen, krzem, żelazo — skaliste planety. Niektóre rodzące się gwiazdy tworzą systemy planetarne z otaczającego je gazu. W ten sposób z wirujących dysków materii powstają nowe układy słoneczne (patrz il. 7.6). Wszystkie powyższe procesy zachodzą teraz, na naszych oczach, w Mgławicy Oriona[3]. W niektórych gwiezdnych wylęgarniach powstają tysiące nowych układów słonecznych. Nasza galaktyka liczy 300 miliardów gwiazd. Wiele z nich ma układy planetarne.

A kim my jesteśmy? Dla czytelnika, który wolałby poczuć się kimś ważnym, mam raczej depresyjną wiadomość — jesteśmy kosmicznie nieistotni. Wielokrotnie w naszej historii powtarzano argumenty, że jesteśmy czymś wyjątkowym w kosmosie albo że jesteśmy w centrum Wszechświata, że cały Wszechświat obraca się wokół nas, że jesteśmy zbudowani ze specjalnych składników, że byliśmy tu od początku. Wciąż dowiadujemy się, że jest odwrotnie. Żyjemy w niepozornym zakątku Galaktyki, która leży w niepozornym zakątku Wszechświata. Każdy astrofizyk żyje w takiej rzeczywistości.



ILUSTRACJA 7.6. Protoplanetarne dyski wokół nowo powstałych gwiazd w Mgławicy Oriona, sfotografowane przez Kosmiczny teleskop Hubble'a

Photo credit: M.J. McCaughrean (MPIA), C.R. O'Dell (Rice University), NASA

A teraz poczujesz się jeszcze mniejszy. Na fotografii (il. 7.7), wykonanej przez Kosmiczny teleskop Hubble'a, wszystkie plamki to są całe galaktyki położone tak daleko, że każda z nich zajmuje mały fragment zdjęcia. Każda z tych plamek zawiera ponad 100 miliardów gwiazd. A jest to tylko maleńki fragment Wszechświata. To zdjęcie, zwane Ultragłębokim Polem Hubble'a (Hubble Ultra-Deep Field), najdalej sięgające zdjęcie astronomiczne, jakie wykonano w świetle widzialnym, przedstawia około 10 tysięcy galaktyk. Zajmuje fragment nieba równy 1/65 tarczy Księżyca, czyli około 1/13 z jednej milionowej części całego nieba. Ten kawałek nieba niczym się nie wyróżnia, więc liczba galaktyk, które możemy zobaczyć na całym niebie, jest 13 milionów razy większa, co daje 130 miliardów galaktyk w zasięgu obserwacji teleskopu Hubble'a.



ILUSTRACJA 7.7. Ultragłębokie Pole Hubble'a. Fotografia wykonana przez Kosmiczny Teleskop Hubble'a, obejmująca około 10 tysięcy galaktyk widocznych (m.in. dzięki długiemu czasowi naświetlania — 11,3 dnia) na obszarze około 1/13 z jednej milionowej części sfery niebieskiej, co oznacza, że na całym niebie w zasięgu tego teleskopu znajduje się około 130 miliardów galaktyk

Photo credit: NASA/ESA/S. Beckwith (STScI — Space Telescope Science Institute) oraz zespół HUDF. Odwzorowanie kolorów: Nic Wherry, David W. Hogg, Michael Blanton (New York University), Robert Lupton (Princeton)

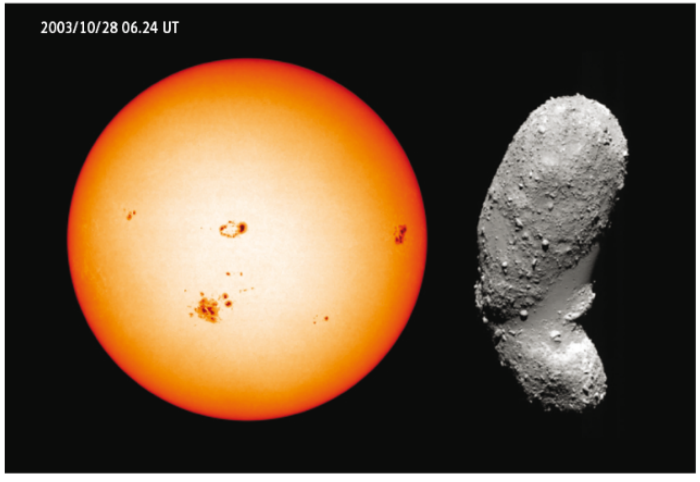
W książce *Błękitna kropka* Carl Sagan[4] zwrócił uwagę, że każda osoba, którą znamy, każda osoba, o której czytaliśmy lub znamy z historii, żyła na Ziemi, na tej jednej, maleńkiej kropce w ogromnym Wszechświecie. Często o tym myślę. Myślę o tym, ponieważ nasz umysł mówi nam: „czuję się mały", nasze serce mówi: „czuję się mały". Lecz teraz poczujesz moc. Czytając tę książkę, poczujesz moc, już nie będziesz „mały". Dlaczego? Ponieważ znasz i rozumiesz prawa fizyki, maszynerię, dzięki której Wszechświat działa. W rezultacie zrozumienie astrofizyki upoważnia do spojrzenia w niebo i do powiedzenia: „Nie, nie czuję się mały, czuję się wielki, ponieważ ludzki umysł, te półtora kilograma szarej materii, zrozumiał te rzeczy. Ale przede mną jeszcze wiele zagadek".

8 – Życie i śmierć gwiazd (II)

Michael A. Strauss

W tym rozdziale bardziej szczegółowo zbadamy naturę gwiazd, opierając się na tym, czego nauczyliśmy się w poprzednim rozdziale. Jakie cechy definiują gwiazdę? Astronom zakwalifikuje ciało niebieskie jako gwiazdę, jeżeli jego własna grawitacja utrzymuje je w całości (ang. self-gravitating), a w jego rdzeniu zachodzi fuzja jądrowa. Ziemia także utrzymuje się w całości dzięki własnej grawitacji. W gruncie rzeczy, własna grawitacja tak dużego ciała jak Ziemia jest znacznie silniejsza od granicznych naprężeń skał. Wiemy to stąd, że Ziemia ma kształt kuli, podobnie jak gwiazdy. Cechą charakterystyczną własnej grawitacji ciał jest dążenie do kulistego kształtu. Mniejsze obiekty, takie jak asteroidy, których własna grawitacja jest słabsza, miewają rozmaite kształty, często wydłużone (il. 8.1), ponieważ utrzymują je w całości naprężenia skał, a bardzo małe ciała niebieskie są często nieregularnymi grudkami kosmicznych śmieci.

W przypadku masywnych obiektów, takich jak Słońce, własna grawitacja jest tak silna, że kompresuje je do kształtu kuli — najbardziej zwartego kształtu (o najmniejszej powierzchni). Jeżeli jednak taki obiekt wiruje, to nie będzie sferyczny. Ruch wirowy powoduje spłaszczenie. Spostrzegł to już Isaac Newton. Jowisz dość szybko wiruje i w rezultacie ma kształt elipsoidy. Jego promień równikowy jest około 7% większy od promienia biegunowego. Najbardziej radykalne przykłady spłaszczenia wirujących obiektów stanowią galaktyki spiralne, o których opowiemy w rozdziale 13[5].



ILUSTRACJA 8.1. Słońce (po lewej) oraz asteroida 25143 Itokawa (po prawej), nie w skali, ilustrują różne kształty tych ciał niebieskich. Słońce o średnicy 1,4 miliona kilometrów ma kształt kuli dzięki własnej grawitacji. Zwróć uwagę na ogromne plamy na Słońcu. Asteroida ma tylko około 1/2 kilometra długości. Jej własna grawitacja jest zbyt słaba, aby nadać jej kulisty kształt. Przyjmuje się, że jest luźnym skupiskiem materiału, który nagromadził się stopniowo i zastygł. Zdjęcie Słońca zostało wykonane przez sondę SOHO (Solar and Heliospheric Observatory — Obserwatorium Słoneczne i Heliosferyczne), statek przeznaczony do obserwacji Słońca. Zdjęcie asteroidy wykonała sonda Hayabusa wystrzelona przez Japońską Agencję Badań Kosmicznych (JAXA)

Photo credits: Słońce: NASA, http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/images/large/mdi20031028_prev.jpg; asteroida Itokawa: http://apod.nasa.gov/apod/ap051228.html

Jeżeli grawitacja gwiazdy przyciąga i utrzymuje jej gaz w kuli, to co powstrzymuje cały ten gaz przed skupieniem w jednym punkcie w środku kuli? Wewnętrzne ciśnienie. Każda porcja gazu jest równocześnie wciągana przez grawitację w głąb kuli i odpychana na zewnątrz przez ciśnienie. Obie siły się wzajemnie równoważą.

Jako analogii możemy użyć balonika. Balon nie jest utrzymywany w całości przez grawitację, lecz przez naprężenie lateksowej powłoki. Powłoka dąży do zmniejszenia objętości balonu, lecz ciśnienie powietrza wewnątrz balonu przeciwstawia się naprężeniu powłoki. Ciśnienie powietrza i naprężenie powłoki wzajemnie się równoważą, w wyniku czego balon utrzymuje kulisty kształt i stałą objętość.

Ciśnienie gazu wewnątrz gwiazdy wzrasta w kierunku centrum gwiazdy, a maleje w kierunku powierzchni. Zjawisko zmniejszającego się ciśnienia wraz ze wzrostem odległości od środka jest znane na Ziemi. Na poziomie morza ciśnienie atmosferyczne wynosi około 1000 milibarów (101,325 kPa), co reprezentuje ciężar całej kolumny powietrza stojącej na jednym metrze kwadratowym powierzchni Ziemi i rozciągającej się do maksymalnej wysokości atmosfery. Gdy unosisz się coraz wyżej w górę nad poziom morza, coraz więcej powietrza jest pod tobą, a pozostała część kolumny atmosfery ponad tobą waży coraz mniej, więc ciśnienie zmniejsza się wraz z wysokością.

Ciśnienie wewnątrz gwiazdy jest funkcją temperatury i gęstości gazu[6]. Wszystkie te wielkości gwałtownie rosną w kierunku centrum gwiazdy.

Zajmijmy się teraz rdzeniem gwiazdy. Nie możemy bezpośrednio go obserwować, ale możemy wnioskować o jego właściwościach na podstawie równań opisujących wewnętrzną strukturę gwiazd i uwzględniających skutki ciśnienia i grawitacji. Równania te opisują stan równowagi, czyli stan, w którym grawitacja i ciśnienie wzajemnie się równoważą w całej objętości Słońca. Rozwiązania tych równań wskazują, że w centrum Słońca temperatura wynosi 15 milionów kelwinów, jak już wspomnieliśmy, natomiast gęstość materii w centrum wynosi około 160 gramów na centymetr sześcienny, sto sześćdziesiąt razy więcej niż gęstość wody. Dla porównania, na Ziemi naturalnie występującą substancją o największej gęstości jest pierwiastek osm, 22,6 grama na centymetr sześcienny (mniej więcej dwa razy więcej niż gęstość ołowiu). Przy tak wysokiej temperaturze gaz we wnętrzu Słońca jest zjonizowany, czyli atomy są pozbawione elektronów. Jądra atomowe oraz elektrony poruszają się z dużą prędkością — taki stan materii jest nazywany plazmą. To właśnie te szybko poruszające się cząstki wytwarzają ciśnienie, które przeciwstawia się grawitacji, przeciwdziała zapadaniu się Słońca i utrzymuje je w równowadze.

Widzieliśmy już, że materia w określonej temperaturze emituje fotony. Dotyczy to także materii w centrum Słońca, o temperaturze 15 milionów kelwinów. Widmo promieniowania ciała doskonale czarnego w tej temperaturze ma maksimum w zakresie promieni X. Czy to oznacza, że Słońce świeci w zakresie X? Nie. Rozważmy foton X wyemitowany w centrum Słońca. Czy może swobodnie się przemieszczać w kierunku powierzchni? Gdy idziesz do przychodni, aby poddać się badaniu rentgenowskiemu, te części twojego ciała, które nie mają być prześwietlane, laborant(ka) zasłania czymś w rodzaju koca zawierającego ołów. To oznacza, że ułamek centymetra ołowiu, o gęstości zaledwie 11,34 grama na centymetr sześcienny, wystarcza, aby pochłonąć padające nań fotony X. A skoro to wystarcza, aby je pochłonąć, to w środku Słońca fotony X także nie dotrą zbyt daleko. W istocie zostają pochłonięte już po przebyciu ułamka centymetra.

Energia takiego zaabsorbowanego fotonu musi jednak znaleźć jakieś ujście. Materia pochłaniająca te fotony rozgrzewa się i wypromieniowuje energię w postaci kolejnych fotonów. W rezultacie nasz mały foton jest wielokrotnie pochłaniany i emitowany. Z rozwiązania równań wynika, że energia wytworzona w centrum Słońca potrzebuje 170 tysięcy lat, aby dotrzeć do powierzchni. Odległość od środka do powierzchni wynosi zaledwie 2,3 sekundy świetlnej. Gdyby ten foton mógł się przemieszczać bez przeszkód, tylko 2,3 sekundy zajęłoby mu pokonanie tej trasy, lecz w warunkach, jakie panują we wnętrzu Słońca, foton porusza się jak potrącany pijak, jest nieustannie pochłaniany i reemitowany, przebijając się mozolnie ze środka do powierzchni[7].

W centrum Słońca rozgrzany do temperatury 15 milionów kelwinów gaz emituje fotony X. Czy do powierzchni Słońca docierają fotony X? Okazuje się, że nie. Za każdym razem energia jest reemitowana w postaci promieniowania odpowiadającego temperaturze, jaka panuje w danej strefie gwiazdy. W miarę przemieszczania się energii od środka do powierzchni temperatura się

zmniejsza. Materia gwiazdy emituje fotony odpowiadające warunkom panującym w miejscu emisji, więc widmo promieniowania zmienia się wraz z malejącą temperaturą. W centrum Słońca dominuje promieniowanie rentgenowskie, lecz widmo stopniowo przesuwa się w kierunku niższej energii, a na powierzchni dominują już fotony światła widzialnego i w takiej postaci docierają do nas.

Gdyby w centrum Słońca nie działał jądrowy tygiel, który podtrzymuje wysoką temperaturę i ciśnienie, Słońce stopniowo zapadałoby się pod wpływem własnej grawitacji, równocześnie tracąc energię wypromieniowywaną z powierzchni. Kurcząc się, Słońce generowałoby energię, na podobnej zasadzie jak kawałek kredy spadający na ziemię zwiększa swoją prędkość i zarazem zwiększa swoją energię kinetyczną. Ta grawitacyjna energia kontrakcji wystarczyłaby, aby Słońce mogło świecić przez około 20 milionów lat z taką mocą jak świeci dzisiaj. W 1856 roku, na długo przed Einsteinem, Hermann von Helmholtz wysunął hipotezę, że właśnie taka powolna grawitacyjna kontrakcja była źródłem energii Słońca. W owym czasie ta hipoteza wydawała się prawdopodobna, gdyż procesy fuzji jądrowej nie były jeszcze znane — zostały odkryte osiemdziesiąt dwa lata później. Mechanizm grawitacyjnej kontrakcji mógłby jednak zapewnić Słońcu energię najwyżej na 20 milionów lat, a obecnie wiemy już, na podstawie datowania izotopów radioaktywnych (czyli pomiarów przemiany uranu w ołów w ziemskich skałach), że Ziemia liczy kilka miliardów lat. Co więcej, wykopaliska wskazują, że temperatura powierzchni Ziemi pozostawała w przybliżeniu stała przez znaczną część tego czasu, a zatem Słońce musiało świecić — mniej więcej tak mocno jak dzisiaj — znacznie dłużej niż 20 milionów lat. Mechanizm grawitacyjnej kontrakcji jako źródło energii Słońca okazał się niewystarczający i hipoteza okazała się fałszywa.

Wszystko stało się jasne, gdy zrozumieliśmy znaczenie wzoru $E = mc^2$. Słońce spala jądrowe paliwo w swoim rdzeniu, zamieniając masę w energię. Procesy jądrowe podtrzymują ciśnienie wewnątrz Słońca, zapewniając mu stabilność, a wytwarzana we wnętrzu energia jest źródłem słonecznego światła. Jądrowa fuzja jest tak wydajnym źródłem energii, że Słońce spokojnie i stabilnie świeciło przez 4,6 miliarda lat, dając życiu na Ziemi długi okres w miarę stabilnych, sprzyjających ewolucji warunków. Obecnie Słońce jest mniej więcej w połowie swojego życia na ciągu głównym.

Przy okazji — jak się mierzy podstawowe właściwości Słońca: promień, masę, moc? Aby zmierzyć promień Słońca, musimy wykonać kilka kroków. Najpierw zmierzyliśmy promień Ziemi. Dokonał tego Eratostenes z Cyreny, grecki matematyk i geograf, około 240 roku p.n.e. Każdego roku w dniu 21 czerwca w południe Słońce przechodzi dokładnie nad głową w miejscowości Syene w Egipcie (obecnie Asuan). Eratostenes wiedział o tym, więc w tym właśnie dniu, 21 czerwca, w południe, zmierzył kąt, 7,2°, pod jakim kierunek obserwacji Słońca jest odchylony od pionu w Aleksandrii, która leży dokładnie na północ od Syene. Arystoteles dowodził, że w trakcie zaćmienia Księżyca Ziemia zawsze rzuca cień w kształcie koła, niezależnie od ich wzajemnego położenia, orientacji i pory dnia. Jedynym kształtem, który zawsze rzuca

kołowy cień, jest kula, więc Eratostenes wiedział, że Ziemia musi mieć kształt kuli. Rozumiał również, że zmiana wysokości Słońca o kąt 7,2°, zmierzona w obu miastach w tym samym momencie, wynika z krzywizny powierzchni Ziemi, co oznacza, że szerokość geograficzna obu miast różni się o 7,2°, czyli około 1/50 całkowitego obwodu Ziemi (360°/50 = 7,2°). Odległość od Aleksandrii do Syene była znana dzięki przewodnikom karawan, więc wystarczyło ją pomnożyć przez 50, i w ten sposób Eratostenes otrzymał obwód Ziemi — około 40 tysięcy kilometrów. Wystarczy podzielić przez 2π i mamy promień Ziemi. Łatwe, gdy już ktoś wymyśli, jak to zrobić!

Z kilku obserwatoriów, położonych w różnych miejscach na powierzchni Ziemi, możemy zmierzyć paralaksę Marsa względem odległych gwiazd. Znając promień Ziemi i mierząc różnicę paralaksy, można wyznaczyć odległość Marsa od Ziemi. Pierwszy taki pomiar wykonał Giovanni Cassini. Z kolei prawa Keplera pozwalają narysować orbity wszystkich planet w jednakowej skali, czyli wykonać model Układu Słonecznego w skali. Teraz wystarczy zmierzyć jedną wielkość, na przykład odległość od Ziemi do Marsa, aby wydedukować rozmiary wszystkich orbit, łącznie z orbitą Ziemi, równą 1 AU. W 1672 roku Cassini obliczył, że odległość Ziemi od Słońca wynosi 140 milionów kilometrów — nieco mniej niż obecna wartość 150 milionów kilometrów.

Znamy rozmiary kątowe Słońca (około 1/2°), więc znając odległość od Ziemi do Słońca, możemy obliczyć promień Słońca. Jest równy połowie średnicy kątowej Słońca (1/4°), podzielonej przez 360° i pomnożonej przez 2π razy odległość od Ziemi do Słońca. Wychodzi około 800 tysięcy kilometrów — promień Słońca jest około stu dziewięciu razy większy od promienia Ziemi. Równie łatwo można policzyć moc Słońca: możemy zmierzyć jasność obserwowaną Słońca na Ziemi, a gdy znamy odległość *r*, prawo odwrotnych kwadratów pozwoli nam obliczyć moc — około 4×10^{26} watów.

Możemy także obliczyć masę Słońca. Prawa Newtona umożliwiają obliczenie proporcji między masą Ziemi i masą Słońca. Wiemy, jakie przyspieszenie generuje Ziemia w odległości promienia Ziemi od środka Ziemi (czyli tutaj, na powierzchni Ziemi), $GM_E/r_E^2 = 9{,}8$ metra na sekundę na sekundę. Możemy je obliczyć, obserwując spadające jabłka. Wiemy także, jakie przyspieszenie generuje Słońce w odległości 1 AU od Słońca, $GM_S/(1\text{ AU})^2 = 0{,}006$ metra na sekundę na sekundę, które obliczyliśmy w rozdziale 3. Rozważmy stosunek tych dwóch przyspieszeń: 0,006 metra na sekundę na sekundę / 9,8 metra na sekundę na sekundę $= 0{,}0006 = [GM_S/(1\text{ AU})^2]/[GM_E/r_E^2] = (M_S/M_E)(r_E/1\text{ AU})^2$. Wstawiając znane wartości promienia Ziemi oraz 1 AU, obliczymy, że Słońce ma około 330 tysięcy razy większą masę niż Ziemia. Stała *G* występuje po obu stronach wzoru, więc się upraszcza i nie potrzebujemy znać jej wartości, aby obliczyć stosunek masy Słońca do masy Ziemi.

Ale ile wynosi masa Ziemi w kilogramach? Moglibyśmy obliczyć masę Ziemi, wykorzystując wzór na grawitacyjne przyspieszenie na powierzchni Ziemi, 9,8 metra na sekundę na sekundę = GM_E/r_E^2, gdybyśmy znali liczbową wartość Newtonowskiej stałej *G*. Henry Cavendish — odkrywca wodoru, najbardziej

rozpowszechnionego pierwiastka we Wszechświecie — wykonał pomysłowy eksperyment, dzięki któremu wyznaczył wartość *G*. Użył wagi torsyjnej, aby zmierzyć stosunek siły wywieranej na małą kulkę przez Ziemię do siły wywieranej na tę samą kulkę przez dużą kulę ołowiu, o masie 159 kilogramów. Ziemia przyciągała kulkę w dół, a ołowiana kula przyciągała ją w bok. Cavendish wyznaczył stosunek tych sił, mierząc kąt odchylenia wahadła wagi. Znając odległości kulki od ołowianej kuli oraz od środka Ziemi i stosując prawa Newtona, obliczył stosunek masy Ziemi do masy ołowianej kuli. W ten sposób wyznaczył wartość stałej *G* Newtona, a następnie obliczył masę Ziemi w kilogramach. Mnożąc masę Ziemi przez 330 tysięcy, obliczył masę Słońca, wynoszącą 2×10^{30} kilogramów. Całkiem sporo!

Dotychczas zajmowaliśmy się Słońcem. Teraz zajmiemy się także właściwościami innych gwiazd. Wykorzystaliśmy orbitę Ziemi wokół Słońca, aby obliczyć masę Słońca. Na podobnej zasadzie możemy wykorzystać obserwacje par gwiazd („układów podwójnych") krążących wokół wspólnego środka, aby wyznaczyć ich masę.

Gwiazdy o najmniejszej masie na ciągu głównym (gwiazdy typu M) mają masę około 1/12 masy Słońca. A co z gwiazdami, które są jeszcze lżejsze? Przy słabszej grawitacji będą miały niższą temperaturę i mniejszą gęstość rdzenia. Jeżeli w kulistej masie gazu, utrzymywanej przez własną grawitację, temperatura rdzenia jest zbyt niska, nie zacznie funkcjonować fuzja wodoru. Takie obiekty nazywamy nieudanymi gwiazdami lub brązowymi karłami (astronomiczna terminologia jest niekiedy myląca — brązowe karły w rzeczywistości wcale nie są brązowe, lecz czerwone; promieniują głównie w podczerwieni). Istnieją, lecz są słabo widoczne. Świecą słabiutko dzięki ciepłu pochodzącemu z grawitacyjnego kolapsu (takiego, jaki Helmholtz przewidywał dla Słońca), lecz nie mają jądrowego tygla. Mają niską moc, są chłodne — temperatura powierzchni jest w zakresie od 600 do 2000 K — więc promieniują głównie w podczerwieni, a nie w zakresie widzialnym. Dla porównania, piekarnik w twojej kuchni nagrzewa się do 500 K (mało znany fakt: temperatura 574,5 °F jest równa 574,5 K — mniej więcej w tym miejscu (574,58749) przecinają się skale Fahrenheita i Kelvina).

Większość naszych teleskopów rejestruje światło widzialne. Dopiero w ostatnich kilkudziesięciu latach zbudowaliśmy teleskopy, które mogą obserwować niebo w podczerwieni (co zresztą okazało się znacznie trudniejsze z różnych technicznych powodów). Dzięki tym urządzeniom astronomowie byli w stanie obserwować tak słabo świecące obiekty jak brązowe karły.

Typy gwiazd O, B, A, F, G, K i M istnieją od około stu lat, natomiast od 1999 roku, gdy odkryliśmy brązowe karły, dodaliśmy dwa nowe typy: L i T. Dziesięć lat później, teleskop zwany Wide-Field Infrared Survey Explorer (WISE) odkrył jeszcze chłodniejsze obiekty, sklasyfikowane jako gwiazdy typu Y, o temperaturze powierzchni zaledwie 400 K, nieco powyżej temperatury wrzenia wody. Brązowe karły o masie w zakresie od 1/80 do 1/12 masy Słońca (czyli w zakresie 13-80 masy Jowisza) spalają w swoich rdzeniach resztkowe ilości deuteru. A skoro zachodzą w ich rdzeniach reakcje jądrowe,

takie obiekty są także klasyfikowane jako gwiazdy. W rdzeniach jeszcze lżejszych obiektów, o masie poniżej trzynastu mas Jowisza, nie następują żadne reakcje jądrowe. Takie obiekty nazywamy planetami!

Przeanalizujemy teraz śmierć gwiazdy nieco bardziej szczegółowo niż w rozdziale 7. Pod koniec swojej życiowej wędrówki, jeszcze w trakcie ciągu głównego, moc Słońca będzie stopniowo wzrastać. Mniej więcej za miliard lat, licząc od dzisiaj, wszystkie oceany na Ziemi wyparują. Będzie to koniec życia, przynajmniej w takiej formie, jaką znamy dzisiaj. Za prawie pięć miliardów lat w rdzeniu Słońca skończy się wodór (zostanie w całości zamieniony w hel), słoneczny tygiel się wyłączy, a ciśnienie, które powstrzymywało grawitację i utrzymywało gwiazdę w równowadze, zacznie się zmniejszać. Przypomnijmy jednak, że energia wygenerowana w rdzeniu potrzebuje kilkuset tysięcy lat, aby przedostać się na powierzchnię. Gdy wewnętrzne strefy gwiazdy zaczną się zapadać, energia będzie nadal płynąć przez zewnętrzne strefy i podtrzymywać je. Upłynie kilkaset tysięcy lat, zanim przykra wiadomość, że źródło energii w centrum Słońca wygasło, dotrze do powierzchni.

Rozważmy wodorową powłokę, która otacza i bezpośrednio przylega do rdzenia (w którym jest już tylko hel). Poza rdzeniem jest nadal mnóstwo wodoru, lecz do tej pory temperatura i gęstość w owej powłoce były zbyt niskie, aby mogła tam zachodzić jądrowa fuzja. Gdy jednak ta powłoka zaczyna się zapadać, jej temperatura i gęstość rosną i po pewnym czasie fuzja się rozpocznie, pojawi się nowe źródło energii jądrowego tygla — spalanie wodoru w powłoce otaczającej rdzeń.

Gwiazda dostanie nagle drugie życie. Tempo produkcji energii w spalającej wodór powłoce jest znacznie szybsze niż uprzednio w rdzeniu, gdy gwiazda była na ciągu głównym. Co więcej, objętość spalającej wodór powłoki jest większa od objętości rdzenia.

W rezultacie gwiazda będzie produkować ogromne ilości energii, aczkolwiek niezbyt długo. Trochę czasu upłynie, zanim to promieniowanie wydostanie się na zewnątrz, a wzrost ciśnienia zacznie wygrywać wojnę z grawitacją. Zewnętrzne obszary zaczną się rozszerzać (i trochę ochładzać), mimo że wewnętrzne się zapadają. Słońce stanie się czerwonym olbrzymem, jak opisaliśmy w rozdziale 7. Zewnętrzne powłoki (poza powłoką, w której nadal spalany jest wodór) rozszerzą się, promień Słońca wzrośnie do niewiarygodnych rozmiarów, około 1 AU (czyli Słońce będzie dwieście razy większe niż obecnie). Mniej więcej za osiem miliardów lat, gdy Słońce nadal będzie w fazie czerwonego olbrzyma, oddziaływania pływowe prawdopodobnie spowodują, że orbita Ziemi zamieni się w spiralę, nasza planeta wpadnie w atmosferę Słońca i spłonie.

Gdy w otaczającej rdzeń powłoce wciąż spalany jest wodór, helowy rdzeń nie ma własnego źródła energii; grawitacja powoduje, że rdzeń nadal się kurczy i zarazem się nagrzewa. Gdy temperatura rdzenia osiągnie około 100 milionów kelwinów, zacznie się fuzja helu. Spalanie helu (w wyniku którego w rdzeniu pojawi się węgiel i tlen) będzie trwać około dwóch miliardów lat. Gdy hel się skończy, rdzeń ponownie zacznie się zapadać.

Dla gwiazdy o takiej masie jak nasze Słońce to już prawie koniec. Zewnętrzne warstwy są bardzo daleko od rdzenia, grawitacyjne przyciąganie jest słabsze i wystarczy tylko trochę więcej energii, aby odrzucić zewnętrzne powłoki, które stopniowo rozszerzają się jak lekki gazowy balon otaczający gorący, gęsty, węglowo-tlenowy rdzeń. Balon jest oświetlony od środka przez ultrafioletowe promieniowanie wewnętrznych warstw, w wyniku czego z zewnątrz wygląda jak mgławica Hantle, przedstawiona na ilustracji 8.2. Takie obiekty nazywamy mgławicami planetarnymi. Nieco myląca nazwa pozostała z czasów, gdy pierwsi astronomowie, którzy obserwowali takie obiekty przez teleskopy, sądzili, że są one podobne do planet. Astronomowie mają nostalgiczną skłonność do pozostawiania starych nazw, nawet gdy stają się nieadekwatne lub mylące.

Ten rozległy balon gazu, który kiedyś był częścią gwiazdy, rozchodzi się teraz w przestrzeń. Niektóre nieco cięższe niż Słońce gwiazdy kilkakrotnie odrzucają swoje zewnętrzne powłoki, w wyniku czego powstają mgławice planetarne z wieloma warstwami gazu wokół rdzenia. Kolejne warstwy pochodzą z kolejnych wewnętrznych powłok gwiazdy, w których występują różne pierwiastki. Rotacja pierwotnej gwiazdy może spowodować, że odrzucony materiał rozchodzi się preferencyjnie wzdłuż osi rotacji, tak jak w przypadku mgławicy Hantle (il. 8.2).

Odsłonięty rdzeń gwiazdy jest teraz widoczny w samym środku mgławicy. Jest mały (mniej więcej taki jak Ziemia) i na tyle gorący, że jest widoczny jako biała kropka. Nazywamy go białym karłem. Biały karzeł nie ma wewnętrznego źródła energii, więc jego temperatura stopniowo — w ciągu miliardów lat — się obniża. Białe karły są wciąż uważane za gwiazdy, mimo że nie spalają jądrowego paliwa (przyznaję, że ta nomenklatura nie jest całkowicie spójna!).



ILUSTRACJA 8.2. Mgławica Hantle. Czerwony olbrzym, który odrzucił zewnętrzne warstwy, odsłaniając gorący, gęsty rdzeń białego karła widocznego w środku. Zewnętrzne warstwy są oświetlone od wewnątrz przez ultrafioletowe promieniowanie emitowane przez rdzeń, i są widoczne jako mgławica planetarna

Photo credit: J. Richard Gott, Robert J. Vanderbei, *Sizing Up the Universe*, „National Geographic", 2011

Dlaczego biały karzeł nie ulega grawitacyjnemu kolapsowi? Zakaz Pauliego, zasada fizyki odkryta przez Wolfganga Pauliego, mówi, że dwa elektrony nie mogą zajmować tego samego stanu kwantowego. To jest kluczowy aspekt

zrozumienia struktury atomów. W atomie o wielu elektronach orbitale są po kolei zajmowane, począwszy od najbardziej wewnętrznych powłok. Kolejne elektrony trafiają na powłoki o coraz wyższej energii. W przypadku białych karłów zakaz Pauliego oznacza, że elektrony nie lubią być ściśnięte zbyt blisko siebie; pojawia się wewnętrzne ciśnienie, które przeciwstawia się grawitacji. Nasze Słońce skończy żywot jako biały karzeł.

Jak wspomnieliśmy w rozdziale 7, gwiazdy o masie większej od ośmiu mas Słońca przechodzą przez serię bardziej dramatycznych konwulsji. W ich rdzeniach kolejno zapalają się kolejne reakcje jądrowe, w których powstają nie tylko hel i węgiel, ale także neon, krzem oraz kolejne, coraz cięższe pierwiastki wzdłuż tablicy okresowej, aż po żelazo.

Zewnętrzne warstwy tych cięższych gwiazd rosną do znacznie większych rozmiarów niż zwykłe czerwone olbrzymy. Są to nadolbrzymy o promieniach kilka razy większych od 1 AU.

Niektóre jasne gwiazdy, widoczne gołym okiem na nocnym niebie, mają wyraźny czerwony kolor. Czerwone gwiazdy, które znajdują się na ciągu głównym, mają zbyt małą moc, aby były widoczne gołym okiem, natomiast czerwone olbrzymy są duże, mają dużą moc i są widoczne na duże odległości. Wszystkie jasne czerwone gwiazdy na niebie to są czerwone olbrzymy (jak Arktur w konstelacji Boötes i Aldebaran w konstelacji Byka) lub czerwone nadolbrzymy (jak Betelgeza w Orionie).

Naukowcy nadużywają przedrostka „super-”[8]. Wstawiamy go niemal wszędzie, ponieważ wciąż odkrywamy lub robimy rzeczy, które są większe lub bardziej spektakularne: supernowe, supermasywne czarne dziury i oczywiście nigdy niedokończony akcelerator cząstek, znany jako *superconducting supercollider* (nadprzewodzący superzderzacz)! Najsłynniejszy czerwony nadolbrzym na niebie to Betelgeza (w języku angielskim wymawia się jak „beetlejuice”, czyli „sok z żuka”; nieprzetłumaczalna gra dwoma słowami — pochodzącą z języka arabskiego nazwą gwiazdy i tytułem filmu). Jej promień jest około tysiąca razy większy od promienia Słońca, a masa co najmniej dziesięć razy większa od masy Słońca. W jej rdzeniu jest spalany hel, w wyniku czego powstają węgiel i tlen. Wokół rdzenia znajduje się cienka warstwa niemal czystego helu, który nie jest jednak dostatecznie gorący ani dostatecznie gęsty, aby mógł być spalany, więc spokojnie czeka na rozwój wypadków. W przyszłości w rdzeniu będą prawdopodobnie zachodzić procesy spalania kolejnych, coraz cięższych pierwiastków, aż w końcu pojawi się końcowy produkt — żelazo. Tymczasem w kolejnej warstwie wodór jest spalany i zamieniany w hel, a jeszcze dalej od środka rozciąga się cała gwiazda — ogromny balon wodoru i helu.

Opisana tu ewolucja gwiazd poza ciągiem głównym została opracowana głównie w latach czterdziestych i pięćdziesiątych XX wieku, gdy fizycy zrozumieli szczegółowo procesy jądrowe zachodzące w jądrach gwiazd i mogli użyć komputerów, aby rozwiązać równania opisujące strukturę gwiazd. Większość tych prac została wykonana na Uniwersytecie Princeton, pod kierunkiem profesora Martina Schwarzschilda. Neil, Rich i ja mieliśmy okazję

współpracować z nim w ostatnich latach jego życia; był cudownym człowiekiem.

Na fotografii (il. 8.3) widoczni są Schwarzschild, Lyman Spitzer i Richard Gott. Gdy Henry Norris Russell (ten od diagramu HR) przeszedł na emeryturę i przestał pełnić funkcję szefa Princeton University Observatory, zatrudnił dwóch młodych trzydziestoparoletnich astronomów, Martina Schwarzschilda i Lymana Spitzera. Spitzer, który został szefem wydziału, opracował większość obecnie obowiązującego opisu materii międzygwiezdnej (gazu i pyłu międzygwiezdnego) i założył Princeton Plasma Physics Laboratory, gdzie naukowcy pracują nad wykorzystaniem fuzji jądrowej jako źródła energii. Spitzer jest znany opinii publicznej jako ojciec Kosmicznego teleskopu Hubble'a. To on opracował początkową koncepcję teleskopu i przez dziesiątki lat przekonywał do tego projektu społeczność astronomów oraz Kongres USA. Spitzer i Schwarzschild byli filarami wydziału astrofizyki na Uniwersytecie Princeton przez czterdzieści osiem lat. Zmarli w odstępie jedenastu dni w 1997 roku, co było szokiem dla nas wszystkich.

W latach pięćdziesiątych Schwarzschild i jego studenci opracowali szczegóły procesów, które opisuję w tym rozdziale. Schwarzschild był jednym z pierwszych naukowców, którzy rozumieli wszystkie aspekty ewolucji gwiazd. Ojciec Martina, Karl Schwarzschild, odegrał główną rolę w badaniach czarnych dziur; jego nazwisko pojawi się ponownie w rozdziale 20.

Wracamy do naszej opowieści o gwiazdach. Ciśnienie elektronów uniemożliwia kolaps białego karła. Jeżeli jednak masa gwiazdy jest większa od 1,4 masy Słońca, to nawet takie ciśnienie nie jest wystarczające, aby przeciwstawić się grawitacji. Ściśnięte przez grawitację elektrony i protony łączą się ze sobą, tworząc neutrony (przy okazji emitując neutrina elektronowe). Powstaje gwiazda neutronowa — w istocie jest to gigantyczne jądro atomowe zbudowane głównie z neutronów. Zakaz Pauliego obowiązuje także dla neutronów, podobnie jak dla elektronów, więc teraz ciśnienie neutronów podtrzymuje gwiazdę, przeciwstawiając się grawitacji. Neutrony są jednak wielokrotnie cięższe od elektronów, więc równowagowy rozmiar gwiazdy neutronowej (około 25 kilometrów) jest znacznie mniejszy od rozmiarów białego karła. Wyobraź sobie materiał o masie większej od Słońca ściśnięty do rozmiarów nie większych niż wyspa Manhattan (lub 100 milionów słoni w naparstku, jak w rozdziale 1)! Materia gwiazdy neutronowej jest najgęstszą znaną nam substancją. W środku gwiazdy neutronowej gęstość materii sięga 10^{15} g/cm^3.



ILUSTRACJA 8.3. Od lewej: Lyman Spitzer, Martin Schwarzschild oraz Richard Gott w latach dziewięćdziesiątych XX wieku

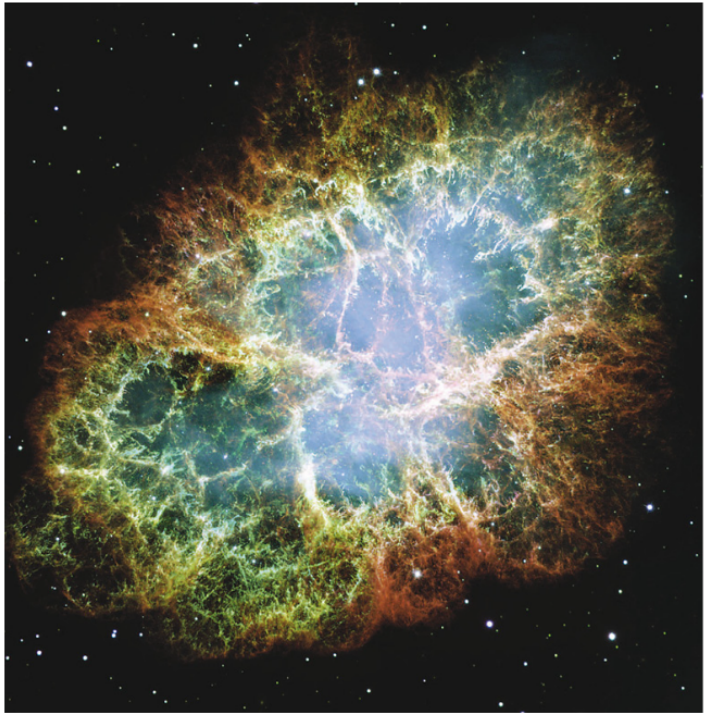
Photo credit: kolekcja J. Richarda Gotta

Jeżeli masa rdzenia ciężkiej gwiazdy przekracza mniej więcej dwie masy Słońca, powstająca z rdzenia gwiazda neutronowa będzie niestabilna i zacznie się zapadać; ciśnienie neutronów nie wystarczy, aby przeciwstawić się grawitacji, więc powstanie czarna dziura. Niezależnie od tego, czy rdzeń zapadnie się do gwiazdy neutronowej czy do czarnej dziury, zapadająca się materia ulega gwałtownej kompresji, wywołując kolejne reakcje jądrowe (materiał wokół rdzenia jest nadal złożony z pierwiastków lżejszych od żelaza). Energia, która zostaje nagle uwolniona, może spowodować odrzucenie całej materii poza rdzeniem, powodując wybuch supernowej. Gwiazdy, które na ciągu głównym mają masę większą od około ośmiu mas Słońca, giną jako supernowe, pozostawiając po sobie gwiazdę neutronową lub czarną dziurę. Takie masywne eksplodujące gwiazdy nazywane są supernowymi typu II. Istnieje wiele możliwych mechanizmów prowadzących do wybuchu supernowej. Może to być układ potrójny — trzy gwiazdy krążące wokół wspólnego środka masy, z których dwie są białymi karłami. Grawitacyjne oddziaływanie może spowodować zderzenie białych karłów. W wyniku zderzenia ich jądrowe paliwo eksploduje w postaci supernowej. Może to być także układ podwójny, w którym biały karzeł pochłania część masy swojego towarzysza, czerwonego olbrzyma. Gdy przekroczy granicę 1,4 masy Słońca, zapada się i wybucha jako supernowa. Takie supernowe są klasyfikowane jako typ Ia, w odróżnieniu od wybuchów masywnych gwiazd, czyli supernowych typu II. Wrócimy do tego tematu w rozdziale 23, gdzie posłużą jako ważne narzędzie do pomiarów przyspieszenia ekspansji Wszechświata.

Niezależnie od typu supernowej zewnętrzne gazowe powłoki zostają wyrzucone w przestrzeń. W odróżnieniu od łagodnego rozszerzania się materii w mgławicy planetarnej wybuch supernowej to niezwykle gwałtowny proces. Większa część gwiazdy zostaje rozerwana, a jej materia jest wyrzucana z prędkością sięgającą 10% prędkości światła. Ciężkie pierwiastki, wyprodukowane w rdzeniu gwiazdy, zostają uwolnione do przestrzeni międzygwiezdnej jako potencjalny materiał do budowy następnego pokolenia gwiazd i planet.

W 1054 roku chińscy astronomowie spostrzegli nową gwiazdę w konstelacji, którą obecnie nazywamy konstelacją Byka (Taurus). Chińczycy byli uważnymi obserwatorami nieba, gdzie wypatrywali przepowiedni przyszłych zdarzeń, więc byli pod wielkim wrażeniem tego „gwiezdnego gościa". Gwiazda była widoczna przez dwa lata, a w początkowej fazie była tak jasna, że była także widoczna w ciągu dnia. Co ciekawe, nie mamy żadnych spisanych dowodów, że widział ją ktokolwiek w Europie, mimo że przez wiele tygodni była najjaśniejszym obiektem na niebie. Być może niebo w Europie było zachmurzone przez cały ten czas, może europejskie zapisy zaginęły, a może chińscy astronomowie zwracali większą uwagę na to, co się na niebie dzieje.

Zdjęcia Mgławicy Kraba w konstelacji Byka (il. 8.4), wykonywane co kilkadziesiąt lat, wyraźnie wskazują, że mgławica się rozszerza. Biorąc pod uwagę obserwowane tempo ekspansji oraz obecne rozmiary mgławicy, możemy oszacować jej wiek. Obliczenia wskazują, że mgławica powstała około tysiąca lat temu, czyli mniej więcej wtedy, gdy Chińczycy obserwowali swojego „gwiezdnego gościa". Zatem Mgławica Kraba położona dokładnie w tym obszarze nieba, na który wskazują chińskie zapisy, stanowi pozostałość supernowej, którą obserwowali. Za kilkaset tysięcy lat ten gaz stanie się tak rozrzedzony, że będzie w zasadzie niewidoczny i zmiesza się z ośrodkiem międzygwiezdnym.



ILUSTRACJA 8.4. Mgławica Kraba. rozszerzające się pozostałości wybuchu supernowej (obserwowanej na Ziemi w 1054 roku n.e.)

Photo credit: Kosmiczny Teleskop Hubble'a, NASA

W środku Mgławicy Kraba odkryto gwiazdę neutronową wirującą w tempie 30 obrotów na sekundę. Gdy gwiazda się zapada, jej moment pędu jest zachowany, więc zaczyna szybciej wirować jak łyżwiarka przyciągająca

ramiona do ciała. Pola magnetyczne także ulegają kompresji i wzmocnieniu w trakcie zapadania się gwiazdy. Pole magnetyczne na powierzchni gwiazdy neutronowej w Mgławicy Kraba jest około 10^{12} razy silniejsze od pola magnetycznego na powierzchni Ziemi. Pole magnetyczne wirującej gwiazdy neutronowej jest źródłem fal radiowych emitowanych w dwóch wiązkach, które obracają się wraz z gwiazdą, podobnie jak światło latarni morskiej. Za każdym razem, gdy taka wiązka omiata Ziemię, rejestrujemy impuls promieniowania radiowego. Gwiazda będąca źródłem tego promieniowania nosi nazwę pulsara radiowego (ang. *radio pulsar*). Pierwszy pulsar o okresie obrotu równym 1,33 sekundy został odkryty w 1967 roku. Odkryła go doktorantka, Jocelyn Bell. Jej promotor, Antony Hewish otrzymał za to odkrycie nagrodę Nobla z fizyki. Uważam za skandal to, że Bell została pominięta.

Pulsar w Mgławicy Kraba emituje promieniowanie elektromagnetyczne w pełnym zakresie widma, od częstości gamma po radiowe. Także w zakresie widzialnym pulsar mruga sześćdziesiąt razy na sekundę (obie wiązki po kolei nas omiatają), lecz astronomowie tego nie zauważyli, dopóki nie zostały odkryte impulsy radiowe. Pulsar wyglądał po prostu jak słaba gwiazda w środku Mgławicy Kraba. Mgławica jest oddalona o sześć i pół tysiąca roku świetlnego, co oznacza, że eksplozja nastąpiła około 5445 roku p.n.e., lecz jej światło dotarło do nas dopiero w 1054 roku n.e.

Przypomnij sobie prawo odwrotnych kwadratów. Najbliższa gwiazda, Alfa Centauri, jest oddalona o cztery lata świetlne. Mgławica Kraba jest znacznie dalej, lecz supernowa była najjaśniejszą gwiazdą na nocnym niebie i była łatwo widoczna w ciągu dnia. W maksimum (w momencie największej mocy) jej moc była około 2,5 miliarda razy większa od mocy Słońca.

Supernowe są rzadkim zjawiskiem. Ostatnią supernową, jaka wybuchła w Drodze Mlecznej, zaobserwowano ponad czterysta lat temu, zanim Galileusz skierował ku niebu swój teleskop. Dlatego w 1987 roku astronomowie z wielkim zainteresowaniem obserwowali supernową w Wielkim Obłoku Magellana — w małej galaktyce będącej satelitą Drogi Mlecznej. To była najbliżej położona supernowa we współczesnej historii. Była tak jasna, że była widoczna gołym okiem, mimo odległości wynoszącej 150 tysięcy lat świetlnych. Miałem szczęście, ponieważ w maju 1987 roku byłem w Chile, aby w ramach mojego doktoratu prowadzić obserwacje przez tamtejsze teleskopy, i mogłem na własne oczy zobaczyć tę „nową" gwiazdę w Wielkim Obłoku Magellana.

9 – Dlaczego Pluton nie jest planetą

Neil deGrasse Tyson

Oto historia o tym, jak Pluton stracił status planety i został zdegradowany do roli lodowej kuli w zewnętrznej strefie Układu Słonecznego, a także o mojej

roli w tym procesie w Rose Center of Earth and Space w Muzeum Historii Naturalnej.

Gdy budowaliśmy Rose Center, chcieliśmy stworzyć coś więcej niż obiekt, w którym będzie można zobaczyć piękne obrazy kosmosu — do tego wystarczy Internet. Stworzyliśmy sferę o średnicy 87 stóp (26,5 metra) wewnątrz szklanego sześcianu, gdzie zarówno architektura, jak i eksponaty mają sprawić, że czujesz się, jakbyś był częścią Wszechświata — że idziesz przez Wszechświat. Nasza sfera jest pełna. Planetaria mają zwykle kopułę, w środku projektor, oraz otaczające kopułę korytarze, gdzie można zobaczyć obrazy kosmosu. Większość planetariów jest tak zbudowana. Obrazy kosmosu są piękne, ale my uważaliśmy, że trzeba widzom pokazać, jak Wszechświat działa, więc naszymi eksponatami są wszystkie istotne koncepcje dotyczące kosmosu.

Koncepcję naszego planetarium współtworzyli architekci, Jim Polshek i partnerzy, oraz projektanci, Ralph Appelbaum i współpracownicy (najlepiej znani z projektu Muzeum Holokaustu w Waszyngtonie). Wszechświat kocha sfery. Wiele można się nauczyć i zrozumieć z samego faktu, że prawa fizyki faworyzują okrągłe kształty, poczynając od gwiazd, przez planety, po atomy. A w większości przypadków, gdy coś nie jest sferyczne, istnieje jakaś interesująca przyczyna, która temu przeciwdziała, na przykład obiekt szybko wiruje. Jeżeli zaczniemy od sferycznej struktury architektonicznej, możemy wykorzystać ją jako element ekspozycji, umożliwiając porównanie rozmiarów różnych obiektów we Wszechświecie. W górnej połowie sfery znajduje się Hayden Planetarium, natomiast w dolnej mieści się teatr Wielkiego Wybuchu, gdzie zwiedzający mogą obserwować z góry symulację początków Wszechświata.

Wzdłuż 87-stopowego obwodu sfery zbudowaliśmy chodnik. Spacerując tym chodnikiem, poznasz „skale Wszechświata". Na początku powinieneś wyobrazić sobie, że sfera planetarium stanowi cały widzialny Wszechświat. Na poręczy jest umieszczony model, o średnicy około 10 centymetrów, reprezentujący naszą supergromadę zawierającą tysiące galaktyk, łącznie z Drogą Mleczną. Uświadamiasz sobie, że Wszechświat jest znacznie, ale to znacznie większy niż nasza okolica, dla której mamy nazwę albo, jak kto woli, linijkę w adresie: Virgo Supercluster (Supergromada Lokalna, Supergromada w Pannie). Idziesz dalej i po kilku krokach prosimy cię, abyś zmienił skalę: wyobraź sobie teraz, że sfera planetarium — całe 26,5 metra — reprezentuje Supergromadę Lokalną. Na poręczy widzisz model — o średnicy około 2 stóp — który zawiera Drogę Mleczną, Galaktykę Andromedy oraz kilkadziesiąt galaktyk satelitarnych — to jest nasza Lokalna Grupa Galaktyk. Następnie sfera planetarium staje się Lokalną Grupą Galaktyk, a na poręczy mamy model Drogi Mlecznej o średnicy kilku stóp, który wygląda jak duże jajko sadzone — płaskie i z wybrzuszeniem w środku. Kilka kroków dalej sama Droga Mleczna staje się sferą planetarium, a na poręczy mamy pleksiglasową sferę reprezentującą gromadę kulistą gwiazd w Drodze Mlecznej. Następnie owa gromada kulista staje się sferą planetarium, a na poręczy mamy sferę, o

średnicy około 15 centymetrów, zawierającą strefę komet, która otacza nasz układ słoneczny: Obłok Oorta.

Niezliczone komety z Obłoku Oorta docierające do wewnętrznej strefy Układu Słonecznego to najgroźniejsza klasa obiektów zagrażających uderzeniem w Ziemię. Charakteryzuje je ogromna energia kinetyczna, ponieważ przybywają z zewnętrznych obszarów Układu Słonecznego i przyspieszają, zbliżając się do Słońca. Ostatnia wizyta komety z Obłoku Oorta w wewnętrznej strefie Układu Słonecznego zdarzyła się prawdopodobnie ponad 40 tysięcy lat temu, więc nie mamy na jej temat żadnych historycznych informacji. Gdyby jedna z tych komet zmierzała w naszą stronę, niewiele moglibyśmy zrobić. Gdyby to była zwykła asteroida, zazwyczaj możemy znacznie wcześniej przewidzieć jej trajektorię. Potrafimy obliczyć i wykreślić orbitę asteroidy, orbitę Ziemi, a następnie potrafimy obliczyć, czy po stu okrążeniach orbity asteroida trafi w Ziemię. To dałoby nam sto lat na przygotowanie kosmicznej misji, aby zmienić trajektorię asteroidy. Ale gdy zza orbity Neptuna nadlatuje w naszym kierunku kometa, mamy niewiele czasu [9].

Na kolejnym przystanku wzdłuż „skal Wszechświata” znajduje się sfera reprezentująca Słońce oraz modele planet w odpowiedniej skali względem Słońca. Idąc dalej, porównujemy coraz mniejsze skale, aż dotrzemy do atomu. Gdy sfera planetarium jest atomem wodoru, pokazujemy kropkę o rozmiarach jądra wodoru — o średnicy 1/5 milimetra — która uzmysławia nam, w jakim stopniu atom jest pustą przestrzenią.

W ten sposób sfera planetarium stała się potężnym narzędziem umożliwiającym badanie względnych rozmiarów we Wszechświecie.

Ilustracja 9.1 przedstawia nocny obraz Rose Center w całej okazałości. Po lewej widoczny jest fragment chodnika, gdzie możemy porównywać rozmiary Słońca oraz planet. Widoczny jest Saturn (wraz ze swoimi pierścieniami), Jowisz oraz oczywiście Uran i Neptun. Merkury, Wenus, Ziemia i Mars są zbyt małe, aby były widoczne z tej perspektywy. Ich modele, o rozmiarach od piłki do bejsbola po grejpfruta, są umieszczone na poręczy; nie są zawieszone na linkach zwisających z sufitu. Od tego zaczęły się kłopoty z Plutonem. Nie bez powodu nie dołączyliśmy modelu Plutona w odpowiedniej skali, obok Merkurego, Wenus, Ziemi i Marsa.

Znaleźliśmy się w centrum kontrowersji, której wcale nie wywołaliśmy. Rok po otwarciu wystawy odwiedził ją dziennikarz, zauważył brak Plutona w sekcji ilustrującej względne rozmiary planet i zdecydował się nadać sprawie rozgłos, publikując na ten temat materiał na pierwszej stronie „New York Timesa”. I wtedy się zaczęło. A oto tło całej sprawy, czyli co i dlaczego zrobiliśmy.



ILUSTRACJA 9.1. Nocne zdjęcie Rose Center of Earth and Space. W nocy 26,5-metrowa sfera, skąpana w niebieskim świetle, jest widoczna wewnątrz szklanego sześcianu. Modele Jowisza i Saturna, wykonane w skali, wiszą obok dużej sfery reprezentującej Słońce. Brak modelu Plutona w tej części wystawy wywołał sporą kontrowersję

Photo credit: Alfredo Gracombe

Historia Plutona zaczyna się od Percivala Lowella, wielce dystyngowanego dżentelmena z Nowej Anglii. Lowell był miłośnikiem astronomii, a ponieważ był bogaty, więc zbudował własne obserwatorium (jak łatwo zgadnąć, zwane Lowell Observatory). Obserwatorium znajduje się w miejscowości Flagstaff w Arizonie, na wysokości 7250 stóp (2,2 km), na wzgórzu nazwanym Mars Hill (Wzgórze Marsa). Lowell był fanatykiem Marsa; tak bardzo kochał tę planetę i tak bardzo chciał, aby była siedliskiem życia, że napisał na ten temat trzy książki. Czym innym jest jednak pisanie książek o możliwości istnienia życia na Marsie, a czym innym twierdzenie, że życie na Marsie istnieje. Lowell (i tylko on jeden) twierdził, że na własne oczy widział dowody na istnienie życia na Marsie. Widział sezonowe zmiany roślinności, kanały, a w miejscach przecięcia kanałów widział oazy. Uważał, że Marsjanom brakuje wody, ponieważ kanały rozchodziły się od biegunów do obszarów wegetacji. Mars ma czapy lodowe na biegunach. Lowell wyobrażał sobie, że Marsjanie topią lód, a następnie kierują wodę kanałami wszędzie tam, gdzie jest potrzebna. Gdyby nie te przedsięwzięcia, marsjańskie życie zostałoby pozbawione wody i skazane na zagładę. Ludzki umysł cechuje nieograniczona wyobraźnia — dlatego stosujemy naukowe metody sprawdzania naszych hipotez. W 1877 roku, w trakcie zbliżenia Marsa i Ziemi, Giovanni Schiaparelli zaobserwował na Marsie linie albo kanały, które nazwał *canali*. To słowo można przetłumaczyć na angielski jako *channels* lub *canals* i łatwo można pomylić jego dwa znaczenia. *Channels* może dotyczyć naturalnych formacji w planetarnym krajobrazie. Słowem *canals* określamy kanały budowane przez inteligentne cywilizacje. To dwa zasadniczo odmienne znaczenia, lecz było już za późno. Lowell podchwycił pomysł i wywiódł z niego złożony system kanałów na Marsie. Inni obserwatorzy nie dostrzegli jednak tych obiektów

przez swoje teleskopy. Obserwacje Lowella uznano za optyczne złudzenia, gdy oko łączy przypadkowe struktury i tworzy z nich linie. Na współczesnych fotografiach Marsa nie widzimy żadnych sieci kanałów. Okazało się, że obszary „roślinności" to bazaltowe skały, które mają zielonawy kolor — w odróżnieniu od czerwonych obszarów pustynnych — i okresowo są odkrywane lub przykrywane przez nawiewane wiatrem pyły.

Oprócz swego zainteresowania Marsem Percival Lowell zainicjował także poszukiwania planety X. Na przełomie XIX i XX wieku znanych było osiem planet: Merkury, Wenus, Ziemia, Mars, Jowisz, Saturn, Uran i Neptun. Okazało się, że prawa Newtona pięknie opisują ruchy wszystkich planet Układu Słonecznego, z wyjątkiem Neptuna. Podejrzewano, że istnieje jakieś nieznane źródło oddziaływania grawitacyjnego zaburzające orbitę Neptuna — nieodkryta planeta. Lowell był przekonany, że taka planeta istnieje i nazwał ją planetą X. Clyde Tombaugh został zatrudniony, aby jej poszukać w pobliżu ekliptyki — płaszczyzny, w której wszystkie znane planety okrążają Słońce. Szukał obiektu, który nieznacznie zmieniałby swoje położenie na fotografiach wykonanych w odstępie kilku dni lub kilku tygodni, co wskazywałoby, że obiekt jest odległą planetą krążącą wokół Słońca. Tombaugh używał przyrządu zwanego komparatorem błyskowym, bardzo ważnego instrumentu w historii astronomii, aczkolwiek dzisiaj wykonujemy takie porównania za pomocą komputera. Jedna fotografia jest umieszczona po jednej stronie przyrządu, druga po drugiej stronie. Astronom widzi przez dwie soczewki obie fotografie oświetlane naprzemiennie błyskami światła. Układ optyczny jest tak skonstruowany, że w mózgu obserwatora obie fotografie zlewają się w jeden nieruchomy obraz, z wyjątkiem obiektu, którego położenie zmienia się przy kolejnych zmianach oświetlenia. Jeżeli cokolwiek na tym obrazie się porusza, staje się wyraźnie widoczne. W ten sposób w 1930 roku Clyde Tombaugh odkrył Plutona.

Nazwę nadała jedenastoletnia Venetia Burney, która akurat wtedy przerabiała w szkole rzymską mitologię. Nazwy planet pochodzą od rzymskich bogów, a Pluton był bogiem świata podziemnego. Oficjalny symbol Plutona stanowią litery P i L, które przypadkowo są także inicjałami Percivala Lowella. Niemal pół wieku później odkryto księżyc Plutona. Pierwszy dowód stanowiło maleńkie wybrzuszenie na obrazie Plutona — na niewielkiej kropelce widocznej na fotografii z 1978 roku. Wiele lat później, gdy kąty obserwacji Plutona były bardziej sprzyjające, mogliśmy rejestrować zaćmienia i tranzyty — okresowe osłabienia światła wzdłuż linii obserwacji z Ziemi, gdy Pluton i jego księżyc przesłaniały się nawzajem, krążąc wokół siebie. Na wysokiej rozdzielczości zdjęciach wykonanych przez Kosmiczny teleskop Hubble'a zobaczyliśmy bezpośrednie obrazy księżyca. Otrzymał imię Charona, przewoźnika, który łodzią przeprawia dusze zmarłych do Hadesu przez rzekę Styks. Zatem Pluton ma księżyc. Jeżeli chcesz być członkiem klubu planet, to dobry początek, więc myśleliśmy, że wszystko jest na dobrej drodze.

Ale był jeden problem. Po pierwsze, gdy odkryto Plutona, sądziliśmy, że to poszukiwana planeta X zaburzająca orbitę Neptuna. Aby to było możliwe, planeta X musi mieć odpowiednio dużą masę. Nie może być zaniedbywalnie

mała w porównaniu z Neptunem i Uranem. A im więcej mieliśmy danych na temat Plutona, im lepsze były pomiary, tym mniejsze okazywały się jego rozmiary i masa. Przez całe dziesięciolecia rozmiary i masa Plutona były coraz mniejsze i mniejsze. Dopiero gdy odkryto Charona, mogliśmy dokładnie zmierzyć masę Plutona — na podstawie grawitacyjnego oddziaływania z Charonem. Okazało się, że masa Plutona to zaledwie 1/500 masy Ziemi — za mało, aby w dostrzegalny sposób zaburzyć orbitę Neptuna. Nie mogliśmy już odwołać się do Plutona, aby wyjaśnić Neptuna. W takim razie co zaburza orbitę Neptuna? Czyżby kolejna planeta X? Poszukiwania trwały nadal, aż do 1992 roku, gdy niejaki Myles Standish (w linii prostej i w dwunastym pokoleniu potomek Mylesa Standisha, jednego z pierwszych kolonistów przybyłych do Ameryki na statku „Mayflower") przeanalizował historyczne dane obserwacyjne, sugerując, że możliwe są dwa różne warianty orbity Neptuna. Współczesny Myles Standish, astrofizyk w Jet Propulsion Laboratory (Laboratorium Napędu Odrzutowego) w Pasadenie w stanie Kalifornia, użył nowszych oszacowań dla masy Jowisza, Saturna, Urana i Neptuna, uzyskanych w latach osiemdziesiątych dzięki przelotom sond Voyager w pobliżu tych planet, i wykluczył jeden zestaw podejrzanych danych otrzymanych w U.S. Naval Observatory (Obserwatorium [Astronomiczne] Marynarki Wojennej Stanów Zjednoczonych) w latach 1895-1905. Po tej korekcie okazało się, że orbita Neptuna jest dokładnie taka, jak przewidują prawa Newtona i nie ma potrzeby działania jakiejś tajemniczej, dodatkowej grawitacji, oprócz tej, która pochodzi od uprzednio znanych obiektów. Planeta X umarła i została pochowana z dnia na dzień.

Co w takim razie mamy zrobić z Plutonem? Jest zdecydowanie najmniejszą planetą. W Układzie Słonecznym jest siedem księżyców, które są większe od Plutona, wliczając księżyc Ziemi. Pluton jest jedyną planetą, której orbita przecina orbitę innej planety, ponieważ jest silnie eliptyczna. Pluton jest zbudowany głównie z lodu — 55% jego objętości stanowi lód. Mamy już nazwę dla lodowych obiektów w Układzie Słonecznym. Mogłyby nosić nazwę „lodowe kule", gdyby nie fakt, że obserwowaliśmy je, zanim wiedzieliśmy, z czego są zrobione, więc używamy innego określenia — komety. Grecy mieli swego rodzaju poetycką skłonność do stosowania opisowych nazw, więc widoczne na niebie ciała z długimi ogonami nazywali „długowłose", wyobrażając sobie zapewne biegnącą po niebie boginię z długimi, rozwianymi włosami (greckie słowo *cometes* oznacza „długowłosa"). To określenie już od dawna funkcjonuje w odniesieniu do lodowych obiektów krążących wokół Słońca. Pluton ma sporo cech wspólnych z kometami, ale pod jednym względem się różni. Jego orbita nie przebiega w pobliżu Słońca. Gdy kometa zbliża się do Słońca, część jej lodu paruje, tworząc długi ogon, zwany warkoczem. Pluton nigdy nie zbliża się do Słońca, więc nigdy nie ma ogona. Mimo tych nietypowych cech astronomowie nie mieli zastrzeżeń co do jego statusu jako planety.

Budując Rose Center, chcieliśmy, aby nasze eksponaty jak najlepiej odzwierciedlały zarówno obecne, jak i przyszłe tendencje w badaniach planet.

Pluton bardziej różni się od Merkurego, Wenus, Ziemi i Marsa niż którakolwiek z tych czterech planet różni się od pozostałych trzech. Merkury, Wenus, Ziemia i Mars to małe, skaliste planety (il. 9.2). To jedna rodzina.

Merkury, położony najbliżej Słońca, ma duży, żelazny rdzeń, śladową atmosferę i pokrytą kraterami powierzchnię. Wenus jest zasłonięta przez chmury. Na ilustracji 9.2 usunęliśmy pokrywę chmur, aby pokazać ukształtowanie powierzchni — niezwykle wysokie łańcuchy górskie i kilka kraterów. Wenus ma grubą atmosferę złożoną głównie z dwutlenku węgla (CO_2), potężny efekt cieplarniany i wysoką temperaturę powierzchni (dla nas byłaby nie do wytrzymania). Mars jest mniejszy od Ziemi i Wenus, ale większy od Merkurego. Ma cienką atmosferę z dwutlenku węgla, która generuje niewielki efekt cieplarniany, dzięki czemu — w połączeniu z większą niż Ziemia odległością od Słońca — Mars jest znacznie zimniejszy niż Ziemia. Ciśnienie atmosferyczne na powierzchni Marsa jest równe około 1/100 ciśnienia na Ziemi. Ciemne obszary na ilustracji 9.2 to bazaltowe skały niepokryte piaskiem. Czerwone obszary, którym Mars zawdzięcza przydomek Czerwona Planeta, to piaszczyste pustynie.



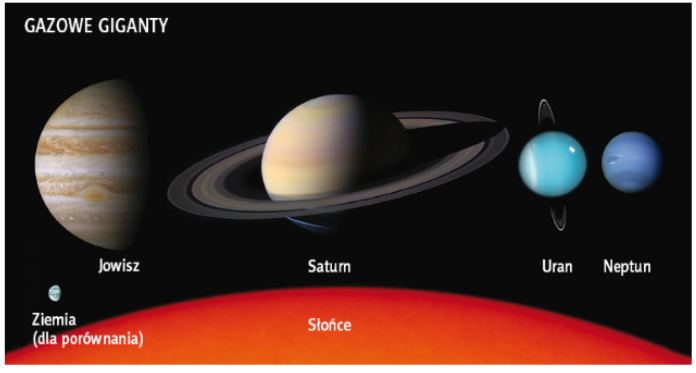
ILUSTRACJA 9.2. Planety skaliste (planety typu ziemskiego) przedstawione w jednakowej skali (z ziemskim Księżycem, dla porównania rozmiarów). Dzięki obrazowaniu radarowemu, wykonanemu przez sondę Magellan, Wenus jest pokazana bez wypełnionej chmurami atmosfery i widoczne są szczegóły jej powierzchni

Photo credit: J. Richard Gott, Robert J. Vanderbei, *Sizing Up the Universe*, „National Geographic", 2011

Co jeszcze tam jest? Mamy Jowisza, Saturna, Urana i Neptuna — duże planety gazowe (il. 9.3). To druga rodzina. Podobnie jak w rodzinie planet skalistych gazowe giganty mają więcej wspólnych cech niż którykolwiek z nich ma cokolwiek wspólnego z Plutonem.

Jowisz krąży poza orbitą Marsa. Składa się głównie z wodoru i helu. Zewnętrzna strefa atmosfery Jowisza zawiera chmury metanu i amoniaku. Widoczne na ilustracji pasy to pasma chmur, a wśród nich Wielka Czerwona Plama, burza trwająca ponad trzysta lat[10]. Saturn jest podobny do Jowisza,

lecz otacza go wspaniały układ pierścieni złożonych z cząstek lodu krążących wokół planety. Uran i Neptun to mniejsze wersje. Uran ma cienkie pierścienie (podobnie jak Jowisz, aczkolwiek nasza ilustracja nie pokazuje pierścieni Jowisza). W 1989 roku sonda Voyager 2 odkryła burzę na Neptunie, Wielką Ciemną Plamę, widoczną na ilustracji. Wokół Plamy wiały wiatry z prędkością sięgającą 2400 kilometrów na godzinę. Obserwacje wykonane pięć lat później przez Kosmiczny Teleskop Hubble'a ujawniły, że Wielka Ciemna Plama zniknęła.



ILUSTRACJA 9.3. Gazowe giganty przedstawione w jednakowej skali (z Ziemią i Słońcem, dla porównania rozmiarów)

Photo credit: J. Richard Gott, Robert J. Vanderbei, *Sizing Up the Universe*, „National Geographic", 2011

Planety skaliste powstają blisko Słońca. Ich temperatura jest na tyle wysoka, że lekkie pierwiastki, takie jak wodór i hel, mogą uciec z zasięgu grawitacji planety. Gazowe giganty formują się znacznie dalej, dzięki czemu są zimniejsze, zachowują swój wodór oraz hel i są bardziej masywne. Planety skaliste i gazowe giganty tworzą dwie rodziny planet. Ich parametry zamieściliśmy w tabeli 9.1.

Pluton tam nie pasuje. W ostatnich kilkudziesięciu latach byliśmy uprzejmi dla Plutona, trzymając go wśród planet, lecz w głębi serca zdawaliśmy sobie sprawę, że nie pasuje do żadnej z dwóch rodzin. W podręcznikach z końca lat siedemdziesiątych (gdy ostatecznie rozstrzygnęliśmy kwestię rozmiarów i masy Plutona) oraz z lat osiemdziesiątych XX wieku widoczna jest tendencja do spychania Plutona do grona komet, asteroid i innych „śmieci" krążących w Układzie Słonecznym. Były to pierwsze symptomy podważania planetarnego statusu Plutona.

Pluton ma także dość problematyczną orbitę. Po pierwsze, jak już wspomniano, przecina orbitę Neptuna. Takie zachowanie nie przystoi planecie pod żadnym pozorem. Po drugie, orbita Plutona jest przechylona pod znacznym kątem względem płaszczyzny, w której poruszają się wszystkie pozostałe planety. To także jest niestosowne. Krótko mówiąc, orbita Plutona nie pasuje do reszty towarzystwa. W 1992 roku znaleźliśmy kolejny obiekt, którego położenie zmienia się na jednej z owych fotografii porównywanych w komparatorze błyskowym. Kolejne lodowe ciało krążące w Układzie Słonecznym poza orbitą Neptuna. Od tego czasu odkryliśmy ponad tysiąc

takich obiektów. Wszystkie krążą poza orbitą Neptuna, a wiele z nich ma orbity, które pod względem pochylenia i ekscentryczności przypominają orbitę Plutona. Ekscentryczność (mimośród) eliptycznej orbity jest miarą, która wskazuje, jak bardzo orbita jest wydłużona — jak bardzo odkształcona od idealnego okręgu. Zgodnie z przewidywaniami Gerarda Kuipera wszystkie te małe, lodowe ciała zamieszkują osobny, własny region Układu Słonecznego, zwany obecnie Pasem Kuipera. Orbita Plutona leży blisko wewnętrznej granicy Pasa Kuipera podobnie jak orbity większości zamieszkujących ten obszar lodowych ciał. Teraz istnienie Plutona ma sens. Ma on rodzeństwo. Ma dom. Pluton jest obiektem z Pasa Kuipera.

Biorąc pod uwagę, że Pluton był największym znanym obiektem w Pasie Kuipera, czyż nie jest słuszne założenie, że pierwszy odkryty obiekt z danego gatunku będzie największy i najjaśniejszy? Ceres, pierwsza odkryta asteroida, nadal jest największą znaną asteroidą. Zwolennicy Plutona początkowo argumentowali, że Pluton jest zbyt duży, aby mógł być obiektem z Pasa Kuipera. Lecz Pluton jest tam, razem z nimi, jest zbudowany z tego samego materiału, a jego orbita ma podobne parametry. Gdy sporządzimy wykres średniej odległości od Słońca w funkcji ekscentryczności orbity dla wszystkich znanych ciał w obszarze Pasa Kuipera, odkryjemy grupę obiektów, których okres obiegu orbity pozostaje w 3:2 rezonansie z Neptunem. Taki rezonans oznacza, że gdy Neptun wykona dwa pełne okrążenia wokół Słońca, obiekt z Pasa Kuipera wykona w tym samym czasie trzy pełne okrążenia — dokładnie tak zachowuje się Pluton. Na obiekt z Pasa Kuipera, który ma tę cechę, mówimy plutino albo plutonek. Pod tym względem plutonki są bardziej podobne do Plutona niż do reszty obiektów z Pasa Kuipera.

TABELA 9.1. Planety Układu Słonecznego

	Planety skaliste				Gazowe giganty			
	Merkury	Wenus	Ziemia	Mars	Jowisz	Saturn	Uran	Neptun
Półoś wielka (AU)	0,39	0,72	1,00	1,52	5,20	9,55	19,2	30,1
Okres (lata)	0,24	0,62	1,00	1,88	11,9	29,5	84,0	165
Średnica/D_E	0,38	0,95	1,00	0,53	11,4	9,0	3,96	3,86
Masa/M_E	0,055	0,82	1,00	0,11	318	95,2	14,5	17,1
Główne pierwiastki	Fe, Si, O	(Fe, Si, O)?	Fe, Si, O, Mg	Fe, Ni, S, Si, O	H, He	H, He	H, He, CH_4	H, He, CH_4
Skład	nieco O,	gruba	O2, N2	cienka	H2, He	H2, He	H_2, He	H_2, He
atmosfery	Si, H, He	CO_2, N_2		CO_2			CH_4	CH_4
Temperatura (°F)	−270 do +800	+820 do +860	−128 do +134	−220 do +95	−256	−310	−364	−368
Temperatura (°C)	−168 do +427	+438 do +462	−89 do +57	−140 do +35	−160	−190	−220	−222

Uwaga: Temperatura dla planet skalistych jest podana na ich powierzchniach (pełny obserwowany zakres), natomiast dla gazowych gigantów w pobliżu górnej warstwy atmosfery.

Wracając do Rose Center. Na wystawie po prostu umieściliśmy Plutona w Pasie Kuipera. Nie wspomnieliśmy nawet, że nie jest planetą. Przy projektowaniu wystawy właściwości fizyczne były bardziej istotne niż etykiety.

I tak było przez rok, aż do feralnego dnia 21 stycznia 2001 roku, gdy „New York Times" opublikował artykuł swojego dziennikarza naukowego, Kennetha Changa:

> Idąc wzdłuż wystawy planet w Rose Center, Pamela Curtice z Atlanty z zakłopotaniem zmarszczyła brwi. Nie mogła się doliczyć wszystkich planet. Zaczęła liczyć na palcach, próbując sobie przypomnieć mnemoniczne reguły, których jej syn lata temu uczył się w szkole. „My Very Educated Mother Just Served Us Nine Pizzas: Mercury, Venus, Earth, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptune[11]. Musiałam od nowa przejść całą drogę, żeby odkryć, której brakuje. Pluton. Brakuje Plutona. Teraz wiem, że moja matka zaserwowała nam dziewięć — stwierdziła pani Curtice. — Dziewięć niczego". Bez rozgłosu i najwyraźniej jako jedyna znana instytucja naukowa nowojorskie Muzeum Historii Naturalnej wyrzuciło Plutona z panteonu planet… „Nie jesteśmy w tej sprawie konfrontacyjni — stwierdził dr Neil deGrasse Tyson, dyrektor należącego do muzeum Hayden Planetarium. — W rzeczywistości trzeba uważnie się przyjrzeć, aby w ogóle to zauważyć".

Starałem się zachowywać dyplomatycznie. Nie stwierdziliśmy, że „jest tylko osiem planet" lub że „wyrzucamy Plutona poza Układ Słoneczny" lub „Pluton nie jest na tyle duży, aby sobie poradzić w Nowym Jorku". Nie. Po prostu inaczej zorganizowaliśmy i przedstawiliśmy informacje — to wszystko. A „New York Times" zrobił z tego federalną aferę.

W dalszej części artykułu autor pisze: „To jednak zdumiewające posunięcie, ponieważ muzeum jednostronnie zdegradowało Plutona, umieszczając go wśród trzystu lodowych ciał krążących po orbitach poza Neptunem, w regionie zwanym Pasem Kuipera".

Pluton krąży wśród tych innych ciał, również zbudowanych z lodu. Tam jest jego miejsce. Przekonaliśmy się o tym w latach dziewięćdziesiątych, gdy odkryliśmy wiele nowych lodowych, podobnych do Plutona obiektów, i przy okazji lepiej poznaliśmy budowę Układu Słonecznego.

Artykuł cytuje mojego kolegę, dr. Richarda Binzela, profesora Massachusetts Institute of Technology — robiliśmy równocześnie swoje doktoraty na tej samej uczelni — który nas skrytykował, ponieważ część swojej kariery poświęcił Plutonowi. Binzel stwierdził wtedy: „Posunęli się za daleko, degradując Plutona, o wiele dalej niż uważają astronomowie". I wtedy szef sekcji planetarnej Amerykańskiego Towarzystwa Astronomicznego, dr Mark Sykes, zadzwonił do „New York Timesa", poinformował ich, że będzie w Nowym Jorku i zaprosił ich na wspólną rozmowę ze mną. Zgodzili się. Przysłali dziennikarza i fotografa, którzy sfotografowali i nagrali prywatną debatę, którą Sykes i ja przeprowadziliśmy w moim biurze. Debata została dosłownie

zacytowana w artykule z 13 lutego 2001 roku. W międzyczasie przeszliśmy wzdłuż chodnika, gdzie wiszą modele gazowych planet, i dr Sykes żartobliwie złapał mnie za szyję. Podpis pod fotografią brzmi: „Dr Mark Sykes rzuca wyzwanie dr. Tysonowi, aby się wytłumaczył z potraktowania Plutona na wystawie w Hayden Planetarium".

To wszystko trafiło do Internetu, do „Wired", do boston.com. „Centrum podważa planetarny status Plutona". Dosłownie wszędzie. A ja spędziłem trzy miesiące mojego życia w mediach, dzień w dzień nie robiąc nic innego, tylko odpowiadając na pytania dziennikarzy. A oto niektóre z komentarzy z czatu online: „Pluton jest prawdziwą, niebieską, amerykańską planetą odkrytą przez Amerykanina" — stwierdził naukowiec z NASA. Ktoś inny powiedział: „Na taki romantyzm nie ma miejsca w nauce, która nigdy nie powinna zaprzestać poszukiwania obiektywnej prawdy. Nie ma także miejsca na nacjonalizm". A oto jeszcze jeden głos po naszej stronie: „Muszę przyznać, iż jestem rozczarowany faktem, że społeczność uczonych dołącza do astrologów, upierając się przy nieaktualnej klasyfikacji". Jeżeli chcesz rozgniewać astronoma, powiedz, że jest astrologiem. Te słowa to otwarta wojna.

Kolejna osoba nie mogła się zdecydować: „Mój osobisty pogląd jest taki, że Pluton prawdopodobnie powinien mieć podwójne obywatelstwo". To szef komisji zajmującej się nazewnictwem w Międzynarodowej Unii Astronomicznej — nie chciał nikogo urazić. Chcesz więcej? „Nie zgadzam się na podwójny status, ponieważ to nadmiernie i niepotrzebnie komplikuje sprawę w oczach opinii publicznej". To nikt inny, tylko David Levy. Święty patron łowców komet. Spośród komet, które odkrył, ponad dwadzieścia nosi jego nazwisko. Był współodkrywcą słynnej komety, która w 1994 roku trafiła w Jowisza, komety Shoemaker-Levy 9. David Levy obawiał się, że zrobimy coś, co zdezorientuje opinię publiczną. Moim zdaniem badania naukowe nierzadko są na tyle skomplikowane, że mogą zdezorientować opinię publiczną, lecz nie powinniśmy jednak kształtować badań naukowych w taki sposób — i tylko po to — aby nie dezorientować opinii publicznej. Inna osoba stwierdziła: „Po pierwsze, to zdumiewające, że Tyson, astrofizyk, w ogóle zapuszcza się w takie okolice. Ja, jako geolog planetarny, czuję się równie wykwalifikowany, aby zdegradować Obłok Magellana z jego obecnego statusu satelitarnej galaktyki Drogi Mlecznej do statusu zwykłej gromady... więc w tym duchu to jest zwykła bujda". To był ktoś inny z NASA.

Kolejny komentarz: „Nietrudno wyobrazić sobie, że w czasach Galileusza tacy sami ludzie powiedzieliby »od dzieciństwa uczono mnie, że Ziemia jest centrum Wszechświata. Po co to zmieniać? Lubię rzeczy takie, jakie są«".

Naukowiec musi zaakceptować fakt, że nauka nie jest niezmienna. Uczymy się kochać same pytania, które stawia. Średnica Charona, księżyca Plutona, jest nieco większa niż połowa średnicy Plutona. Można się upierać, że Pluton nie jest planetą z księżycem, lecz raczej stanowią planetarny układ podwójny. W istocie ich wspólny środek masy nie jest nawet wewnątrz Plutona, lecz w przestrzeni między nimi. Dla porównania — środek masy Ziemi i Księżyca leży wewnątrz Ziemi, około 1700 kilometrów poniżej skorupy Ziemi. To nie oznacza, że Ziemia jest nieruchoma, a Księżyc krąży wokół nas. Oboje krążą

wokół wspólnego środka masy, lecz Ziemia tylko trochę się kołysze, natomiast Księżyc biega po szerokiej orbicie. Pluton jest na tyle duży, że ma kształt kuli. Charon także jest na tyle duży, że ma kształt kuli. Gdyby na tej podstawie uznać Plutona za planetę, Charon także by się zakwalifikował, podobnie jak wiele innych obiektów, które są małe, lecz na tyle duże, że mają kształt kuli.

Pluto, pies z kreskówek Walta Disneya, po raz pierwszy pojawił się w tym samym 1930 roku, w którym Clyde Tombaugh odkrył jego kosmicznego imiennika. Obaj mają tyle samo lat w amerykańskiej psyche. Disney odgrywa ważną rolę w naszej kulturze. Myślę, że gdybyśmy chcieli zdegradować Merkurego, nikt by się nie przejął, ale zdegradowaliśmy Plutona. Kim jest Pluto? Jest psem Myszki Miki. Dla nas w Ameryce to ważna sprawa. To nasza kultura. A przy okazji, czy kiedykolwiek się zastanawiałeś, dlaczego Pluto jest psem Myszki Miki, a Miki nie jest myszką Pluta? Na tyle, na ile zrozumiałem panteon Disneya, jeżeli nosisz ubranie, to możesz być właścicielem innych zwierząt, które ubrań nie noszą. Goofy jest psem, ale nosi ubranie, więc jest przyjacielem, ale nie jest niczyją maskotką. Myszka Miki nosi spodnie. Pluto jest goły, nie licząc obroży, zazwyczaj nie mówi, a zatem może być maskotką i własnością myszy. To świat Disneya.

Wróćmy do dyskusji o planetach. Wśród wielu książek mam na półce kilka wydawnictw sprzed paru wieków. Ich lektura umożliwia prześledzenie, jak ewoluowały poglądy w kwestii naszego miejsca w kosmosie. Jedna z tych książek pochodzi z roku 1802. Czy wiesz, co zdarzyło się w 1801 roku? Rozważając olbrzymi odstęp między orbitami Marsa i Jowisza w Układzie Słonecznym, ludzie doszli do wniosku, że powinna tam być jeszcze jedna planeta. Odstęp jest za duży. W 1801 roku, po dłuższych poszukiwaniach, włoski astronom, Giuseppe Piazzi, znalazł planetę między orbitami Marsa i Jowisza. Nazwano ją Ceres, na cześć rzymskiej bogini urodzaju. Angielskie słowo *cereal* (zboże) pochodzi od Ceres. Wszyscy byli zachwyceni odkryciem nowej planety. Słyszałeś kiedyś o tej planecie? Nie. Jedna książka z tej epoki wspomina o Ceres, gdy wylicza orbity planet: Merkury, Wenus, Ziemia, Mars, Ceres, Jowisz, Saturn i planeta Herschel (jeszcze przed zmianą na Uran). Ceres jest na liście.

W 1781 roku, gdy William Herschel odkrył planetę, która później stała się znana jako Uran, nikt nie miał pomysłu, jak ją nazwać, ponieważ od czasów starożytnych nikt nie odkrył żadnej nowej planety (Michael Lemonick w swojej książce o Herschelu stwierdził, że Kopernik powinien także zostać uznany za odkrywcę planety — Ziemi — ponieważ udowodnił, że Ziemia rzeczywiście jest planetą). Jako wierny poddany Herschel zamierzał nazwać planetę na cześć króla Jerzego III, więc nazwał ją *Georgium Sidus* (gwiazda Jerzego). To ten sam król, Jerzy III, do którego adresowana jest Deklaracja niepodległości Stanów Zjednoczonych. Król Jerzy III uhonorował Herschela, przyznając mu stypendium w wysokości 200 funtów rocznie w zamian za organizowanie pokazów nieba — przy użyciu teleskopów — w pałacu Windsor dla królewskich gości. Lista planet wyglądałaby wówczas następująco: Merkury, Wenus, Ziemia, Mars, Jowisz, Saturn, George.

Na szczęście przeważyły opinie bardziej rozsądnych astronomów, którzy wyszukali wśród greckich bogów odpowiedniego kandydata, aby zastąpił George'a. Johann Bode zaproponował nazwę „Uranus", na cześć greckiego boga niebios, Ouranosa. Nazwa się przyjęła. Tak bardzo spodobała się Martinowi Klaprothowi, niemieckiemu chemikowi, że na cześć nowej planety nadał nazwę „uranium" nowo odkrytemu pierwiastkowi. Zgodnie z tradycją planety noszą imiona rzymskich bogów, natomiast satelity danej planety dostają nazwy od imion postaci lub istot, z którymi miał w życiu do czynienia grecki odpowiednik owego rzymskiego boga. Największe satelity Jowisza to Io, Europa, Ganimedes i Kallisto — w mitologii greckiej miał z nimi do czynienia Zeus, grecki odpowiednik Jowisza. W tym systemie uhonorowane są postaci zarówno rzymskiej, jak i greckiej mitologii. W przypadku Urana, aby wynagrodzić Brytyjczykom zniewagę wyrządzoną ich królowi, złamano tradycję i wszystkie satelity Urana dostały imiona fikcyjnych postaci z angielskiej literatury. Niemal wszystkie pochodzą z Szekspira. Jedno z tych imion, Miranda, wybrałem jako imię dla mojej córki, z tym że wtedy kojarzyłem to imię wyłącznie z księżycem Urana. Gdy powiedziałem mojej żonie, że podoba mi się imię Miranda, odpowiedziała: „O, masz na myśli bohaterkę *Burzy* Szekspira", na co odpowiedziałem: „A, taak... też o tym myślałem".

Wróćmy do planety Ceres. Weźmy inną książkę — trzydzieści lat później — *The Elements of the Theory of Astronomy* — zaawansowany podręcznik, który wymienia dziesięć znanych wówczas planet: Merkury, Wenus, Mars, Westa, Juno, Ceres, Pallas, Jowisz, Saturn, Uran, wraz z odpowiednimi symbolami (♀ dla Wenus, ⊕ dla Ziemi, ♂ dla Marsa yyyyyy itd.).

Neptun nie został jeszcze odkryty. Pojawiły się cztery nowe planety, co w sumie daje dziesięć planet, a wszystkie potrzebują nazw i symboli. W czym problem? Słowo „planeta" nie zostało formalnie zdefiniowane. Ostatnia jednoznaczna definicja określenia pochodzi ze starożytnej Grecji — „planeta" znaczy „wędrowiec". Patrzysz w nocy w niebo. Jeżeli obiekt się porusza na tle gwiazd, to jest planetą. A co się porusza na tle gwiazd? Merkury, Wenus, Mars, Jowisz, Saturn i jeszcze dwa obiekty — Księżyc i Słońce. Siedem planet Wszechświata. To jednoznaczna definicja. Ale Kopernik umieścił Słońce w środku, a Ziemi kazał krążyć wokół Słońca. Czy Słońce wciąż jest planetą? A co z Ziemią? Czy Ziemia jest planetą? Planetami zostały ciała, które krążą wokół Słońca. Komety także krążą wokół Słońca, lecz są niewyraźne i mają warkocze („włosy"), więc nie zaliczymy ich do planet. Ale to arbitralna decyzja. Gdy odkryliśmy te nowe, ale niepodobne do komet obiekty między Marsem i Jowiszem — Westę, Juno, Ceres, Pallas — zaliczyliśmy je do planet. Kilka lat później znaleźliśmy siedemdziesiąt kolejnych. Czy wiesz, co odkryliśmy? Mają więcej cech wspólnych między sobą niż którakolwiek z nich ma coś wspólnego z czymkolwiek innym w całym Układzie Słonecznym. I wszystkie krążą w jednym pasie. Wszystkie te ciała zamieszkują osobny, własny region Układu Słonecznego, zwany obecnie pasem asteroid. Określenie „asteroida" wymyślił William Herschel, który odkrył, że są to bardzo małe ciała w porównaniu z obiektami uważanymi za planety, więc uznał, że asteroidy stanowią nową

klasę obiektów kosmicznych. W rezultacie Westa, Juno, Ceres i Pallas — początkowo uznane za planety — zostały później przeniesione do innej, nowej kategorii, a (co wydaje się znacznie bardziej istotne) przy okazji nauczyliśmy się czegoś nowego o strukturze Układu Słonecznego. Nasza wiedza się poszerzyła, a nasze zrozumienie się pogłębiło. To wszystko stało się około dziesięciu lat po opublikowaniu *The Elements of the Theory of Astronomy*. I mogę się założyć, że skończyły im się symbole.

Średnica Plutona jest równa około 1/5 średnicy Ziemi. Pluton jest mały, podobnie jak inne obiekty z Pasa Kuipera. Na ilustracji 9.4 pokazujemy względne rozmiary (względem Ziemi) pozostałych obiektów Układu Słonecznego (oprócz Słońca i planet), których średnica jest większa niż 254 kilometry. Pokazany jest księżyc Ziemi oraz większe księżyce innych planet, między innymi cztery największe księżyce Jowisza odkryte przez Galileusza, gdy po raz pierwszy skierował swój teleskop w niebo. Ganimedes, największy księżyc Jowisza, jest nieco większy od Merkurego, lecz jego masa jest mniejsza od połowy masy Merkurego. Io i Europa są popychane przez grawitacyjne oddziaływania z pozostałymi księżycami. Oddziaływania z pływami Jowisza powodują, że Io i Europa są nieustannie ugniatane, co z kolei powoduje wzrost temperatury. Io jest pokryta przez aktywne wulkany. Europa ma głęboki na 80 kilometrów wodny ocean pod grubą na 10 kilometrów warstwą lodu. W oceanach Europy jest więcej wody niż we wszystkich oceanach Ziemi. Enceladus, mały satelita Saturna, ma ocean pod lodowcem na biegunie południowym oraz spektakularne wodne gejzery. Tytan, największy księżyc Saturna, ma metanowe jeziora oraz atmosferę złożoną głównie z azotu. Na Tytanie pada metanowy deszcz, a zamarznięte rzeki są wypełnione zamarzniętym metanem. Ciemne plamy to zamarznięte obszary metanowo-etanowe, a jasne to lód — zamarznięta woda. Tryton, duży, lodowy księżyc Neptuna, ma spektakularne gejzery (niewykluczone, że azotowe). Tryton krąży wokół Neptuna w przeciwnym kierunku, co może oznaczać, że jest przechwyconym uciekinierem z Pasa Kuipera. Największe asteroidy i największe obiekty Pasa Kuipera (według naszej wiedzy z 2010 roku) są także pokazane na ilustracji. Ceres jest pierwszą odkrytą asteroidą i jak na razie największą. Westa jest druga pod względem rozmiarów. Jest bogata w żelazo, a jej powierzchnia mogła być wyrzucona w przestrzeń na skutek dawnego zderzenia z inną asteroidą. Wszystkie asteroidy to ciała skaliste. Obiekty z Pasa Kuipera to ciała lodowe. Obrazy Plutona i Charona są takie, jakim dysponowaliśmy w 2010 roku na podstawie obserwowanych fluktuacji ich jasności, gdy nawzajem się zasłaniały. Eris jest przedstawiona tak, jakby była większa od Plutona, gdyż tak wydawało się w 2010 roku, lecz dokładniejsze pomiary wykonane w 2015 roku wskazują, że średnica Eris (2326 ± 12 km) jest nieco mniejsza od średnicy Plutona (2374 ± 8 km). Wszystkie obiekty z Pasa Kuipera są mniejsze od ziemskiego Księżyca.

Podałem wyżej trochę danych i wyników badań dotyczących Plutona, a teraz wróćmy do historii. Co było dalej? „Jeżeli Pluton pozostanie planetą, muzeum będzie musiało wydać trochę pieniędzy, aby zbudować jego model. Ludzie mogą narzekać, że będą musieli kupować nowe plakaty, ale kogo to

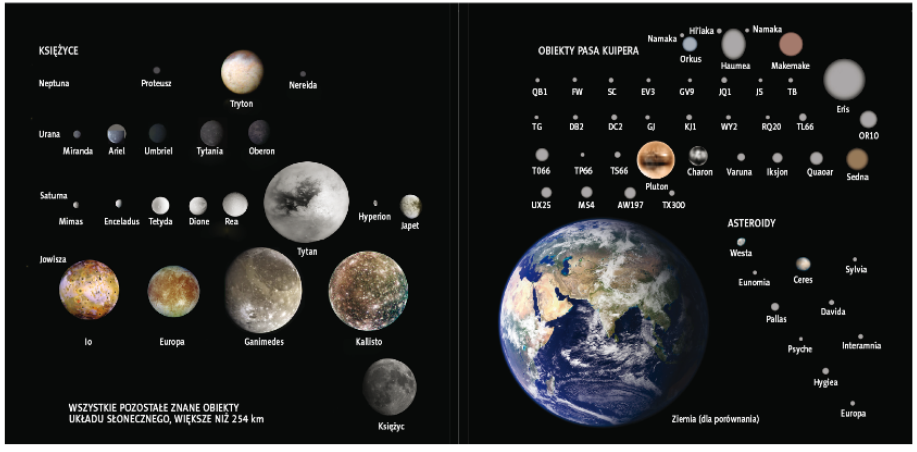
obchodzi? To kosztuje trzy dolary". To od siódmoklasisty. „Co jest nie tak z Plutonem? To dlatego, że jest inny? Dlatego nie uważacie go za planetę? Jeżeli tak, to to jest rasizm". Rasizm?

A oto kolejny temat. „Nauczyciele będą teraz musieli uczyć, że jest osiem planet, a rok temu uczyli, że jest dziewięć. Uczniowie, młodzi uczniowie, będą zdezorientowani, a ja zawsze pamiętam moje planety, gdy mówię »My Very Educated Mother Just Served Us Nine Pizzas«. To bardzo ułatwia i wiele dzieci pamięta planety. A teraz jak będą ich uczyć? Ja jestem dzieckiem, ale widzę, co się dzieje".

W Rose Garden nie liczymy planet. Egzaminacyjne pytania w rodzaju „Która planeta jest czwarta od Słońca?" to nie jest nauka. W Rose Garden nie mówiliśmy, że Pluton nie jest planetą. Nie podkreślamy słowa „planeta". Mówimy, że Układ Słoneczny ma rodziny, a jedna z tych rodzin — planety skaliste (Merkury, Wenus, Ziemia, Mars) — mają pewne wspólne cechy, które wyróżniają jej członków. Pas asteroid to inna rodzina — małe skaliste ciała. Gazowe giganty tworzą rodzinę. Wszystkie obiekty z Pasa Kuipera, łącznie z Plutonem krążącym blisko ich wewnętrznej granicy, mają wspólne cechy. Stanowią kolejną rodzinę. Mamy także chmurę ciał lodowych — komet — czyli Obłok Oorta, który całkowicie otacza Układ Słoneczny od zewnątrz. Podzieliliśmy obiekty krążące wokół Słońca na pięć rodzin. To jest nasz pedagogiczny paradygmat. Istotne jest pytanie, jakie wspólne cechy mają te obiekty. Trzecioklasista może się dowiedzieć, że gazowe giganty są duże i mają małą gęstość — to jest okazja do poznania słowa „gęstość". Są duże i gazowe, jak piłki plażowe. Gęstość Saturna jest mniejsza od gęstości wody. Gdybyś wziął kawałek Saturna i włożył do wanny, to by pływał na powierzchni wody. Gdy byłem dzieckiem, chciałem mieć w wannie Saturna zamiast gumowej kaczki — wydawało mi się, że to byłby fajny pomysł.

Myślę, że Pluton jest teraz szczęśliwy tam, gdzie jest jego miejsce — w Pasie Kuipera. Traktując go tak, jakby był pełnokrwistą planetą, ignorujemy jego fundamentalne cechy. Gdybyśmy potrafili przenieść go w miejsce zajmowane przez Ziemię, wyrósłby mu ogon jak u komety, a to z pewnością nie przystoi planecie.

Zanim jednak zaczniemy postponować Plutona za jego niewielkie rozmiary, rozważmy i pomyślmy z pokorą o następujących proporcjach: Jowisz jest większy w porównaniu z Ziemią niż Ziemia w porównaniu z Plutonem (por. il. 9.3 i 9.4). Gdybyśmy zapytali mieszkańców Jowisza — nazwijmy ich Jowiszanami — „Ile jest planet w Układzie Słonecznym?", jakiej odpowiedzi należy się spodziewać? Cztery. Pytamy dalej: „O, a te pozostałe planety? Ziemia,…". Jowiszanie na to: „Te skałki? Te śmieci? Ci włóczędzy Układu Słonecznego?". Mój argument czy nasz argument w kontekście Plutona nie jest oparty wyłącznie na rozmiarach, lecz obejmuje także właściwości fizyczne oraz parametry orbity.



ILUSTRACJA 9.4. Względne rozmiary obiektów Układu Słonecznego (oprócz Słońca i planet), których średnica jest większa niż 254 kilometry (Ziemia jest dołączona dla porównania)

Photo credit: zaadaptowane z: J. Richard Gott, Robert J. Vanderbei, *Sizing Up the Universe*, „National Geographic", 2011

W 2005 roku Mike Brown i jego zespół na Caltechu (California Institute of Technology) odkryli obiekt w Pasie Kuipera, nazwany Eris, pod względem rozmiarów niemal identyczny jak Pluton i o 27% większej masie (zob. il. 9.4). Eris ma mały księżyc, nazwany Dysnomia. Parametry orbity Dysnomii umożliwiają dokładne oszacowanie masy Eris. Okazało się, że Eris bez wątpienia jest cięższa od Plutona, co postawiło całą argumentację na głowie. Jeżeli Pluton jest planetą, to Eris także musi być uznana za planetę. Musimy albo zdegradować Plutona, albo przyznać Eris status planety. W 2006 roku, w trakcie spotkania Międzynarodowej Unii Astronomicznej (IAU), oficjalnego organu decydującego w takich sprawach, odbyła się specjalna sesja poświęcona statusowi Plutona, Eris oraz innych obiektów Pasa Kuipera. Rezultat? Pluton został zdegradowany ze statusu planety do statusu planety karłowatej. Wiadomość rozeszła się na cały świat. Autorzy podręczników wzięli ją pod uwagę. Aby uzyskać status planety, obiekt musi: (1) krążyć wokół Słońca; (2) mieć dostatecznie dużą masę, aby pod wpływem własnej grawitacji przybrał kształt (bliski) kuli, wynikający z hydrostatycznej równowagi; (3) oczyścić sąsiedztwo wokół swojej orbity ze śmieci. Pluton nie spełnia trzeciego kryterium, podobnie jak Ceres — na orbicie towarzyszą im inne obiekty, których łączna masa jest porównywalna z ich własną masą. Większość astronomów, z Mike'em Brownem, interpretuje „oczyścić sąsiedztwo" w taki sposób, że masa planety musi dominować w sąsiedztwie swojej orbity. Przecież Jowiszowi towarzyszy ponad 5 tysięcy trojańczyków, asteroid zgrupowanych w punktach Lagrange'a, 60° za lub 60° przed Jowiszem wzdłuż jego orbity, ale łączna masa tych asteroid jest znikoma w porównaniu z masą samego Jowisza. Zatem IAU nie zdegradowała Jowisza. IAU potwierdziła, że jest osiem planet w Układzie Słonecznym: Merkury, Wenus, Ziemia, Mars, Jowisz, Saturn, Uran, Neptun. „My Very Excellent Mother Just Served Us Nachos". Pluton, Eris i Ceres, spełniające dwa pierwsze kryteria, są małymi planetami, które zasługują na określenie „planeta karłowata". Czyli Rose Center wyprzedził bieg wypadków o sześć lat. Napisałem książkę *The*

Pluto Files: The Rise and Fall of America's Favorite Planet (2009) (Akta Plutona: powstanie i upadek ulubionej planety Ameryki), w której zawarłem kronikę moich doświadczeń z Plutonem. Mike Brown napisał uroczą książkę o swoim odkryciu Eris, zatytułowaną *How I killed Pluto and Why It Had It Coming* (2010) (Jak zabiłem Plutona i dlaczego to się musiało stać). Odkryto kolejne cztery małe księżyce Plutona, oprócz Charona. Eris ma jeden księżyc, a Haumea (obiekt z Pasa Kuipera, obecnie także sklasyfikowany przez IAU jako planeta karłowata) ma dwa księżyce. W 2006 roku NASA wysłała w kierunku Plutona sondę New Horizons, z popiołami Clyde'a Tombaugha na pokładzie. W 2015 roku sonda, przecinając ich orbitę, przysłała nam piękną fotografię Plutona i Charona, widoczną na ilustracji 9.5. Lodowy obszar w kształcie serca na zdjęciu Plutona został tymczasowo nazwany Tombaugh Regio. Ciemny obszar na biegunie Charona został nieoficjalnie nazwany Mordor, jak kraina cieni we *Władcy pierścieni*. A więc Pluton ma się dobrze.



ILUSTRACJA 9.5. Fotografia Plutona i Charona wykonana przez sondę New Horizons w trakcie przelotu w 2015 roku

Photo credit: NASA

10 – Poszukiwanie życia w Galaktyce

Neil deGrasse Tyson

Jesteśmy żywymi istotami, więc kwestia istnienia życia we Wszechświecie budzi nasze szczególne zainteresowanie. Gdy rozglądamy się we Wszechświecie i zastanawiamy się, czy wokół jakiejś konkretnej gwiazdy krążą planety i czy na tych planetach może istnieć życie, sensowne wydaje się sformułowanie pytań o takie formy życia, jakie znamy na Ziemi. Wydaje się, że żywe istoty mają pewien wspólny zestaw cech. Po pierwsze, znane nam formy życia potrzebują wody. Po drugie, życie zużywa energię. W kategoriach chemicznych to się nazywa metabolizm. I punkt trzeci, najbardziej rozrywkowy: życie ma sposoby, aby się reprodukować. Skupię się na punkcie pierwszym, ponieważ astrofizyka dysponuje metodami i narzędziami, które mogą być użyte w tej kwestii. Będziemy badać Wszechświat w poszukiwaniu ciekłej wody.

Od czasów opowieści o Złotowłosej wiemy (i zgadzamy się), że z punktu widzenia życia może być za gorąco, za zimno lub w sam raz. Weźmy Słońce.

Wiemy, że Słońce ma pewną określoną moc. Im bliżej Słońca, tym cieplej, im dalej, tym zimniej. Skoro życie potrzebuje ciekłej wody, to nie może znaleźć się zbyt blisko Słońca, ponieważ woda wyparuje. Jeśli znajdzie się za daleko, woda zamarznie. To rozumowanie prowadzi do wniosku, że istnieje strefa — pewne określone rozmiary orbity — gdzie planeta może mieć ciekłą wodę. Bliżej Słońca będzie para wodna, dalej od Słońca będzie lód, a pomiędzy może istnieć ciekła woda. Mamy nazwę dla takiej strefy — ekosfera (ang. *habitable zone* — strefa zamieszkiwalna). Ta koncepcja w gruncie rzeczy zdominowała nasz paradygmat przez ponad pół wieku, poczynając od lat sześćdziesiątych, gdy po raz pierwszy się pojawiła. Różne gwiazdy, w zależności od ich mocy mają ekosferę o różnych rozmiarach. Astrofizyk, Frank Drake rozwinął tę koncepcję i stworzył pewne równanie, obecnie zwane równaniem Drake'a. To nie jest równanie w takim sensie jak równania Newtona, lecz raczej sposób organizacji i uporządkowania naszej ignorancji i niewiedzy na temat rozpowszechnienia inteligentnego życia we Wszechświecie.

Zanim przejdziemy do równania Drake'a, sformułujemy kilka prostych reguł, na podstawie tego, co wiemy o życiu. Wydaje się, że życie potrzebuje planety. Powinna to być planeta krążąca wokół gwiazdy. Czyli życie musi znaleźć gwiazdę, następnie planetę, a potem — biorąc pod uwagę, jak wolno ewoluuje życie na Ziemi — planeta potrzebuje miliardów lat, zanim pojawią się na niej inteligentne formy życia. W takim razie gwiazda także musi długo żyć. Nie wszystkie gwiazdy żyją długo. Niektóre nie przeżywają miliarda lat, a niektóre nawet 100 milionów lat. Bardzo ciężkie gwiazdy giną po 10 milionach lat lub nawet szybciej — niewielka nadzieja na inteligentne życie na planecie krążącej wokół takiej gwiazdy, biorąc pod uwagę, jak długo to trwało na Ziemi. Potrzebna jest gwiazda, która żyje długo, oraz planeta, ale nie byle jaka i nie byle gdzie — planeta w ekosferze.

Zatem wiemy, że mamy szukać długo żyjącej gwiazdy, planety w ekosferze, na której istnieje życie, ale nie byle jakie życie — inteligentne życie. Przez większą część historii Ziemi rządziły tu mikroorganizmy zwane cyjanobakteriami, które siały zniszczenie w atmosferze naszej planety. Naukowcy narzekają dzisiaj, że ludzkość zanieczyszcza środowisko, unicestwia ozon w atmosferze i wytwarza gazy cieplarniane, takie jak CO_2. Ale nasze wyczyny bledną w porównaniu z tym, co 3 miliardy lat temu z atmosferą ziemską potrafiły zrobić cyjanobakterie. W atmosferze było wtedy dużo dwutlenku węgla i zero tlenu. Gdy pojawiły się cyjanobakterie, zaczęły konsumować CO_2 i wytwarzać tlen, kompletnie zmieniając równowagę i skład atmosfery. Atmosfera Ziemi stała się bogata w tlen i uboga w CO_2. Dla większości anaerobowych (beztlenowych) organizmów tlen jest trucizną. Dwutlenek węgla jest gazem cieplarnianym, więc gdy zaczęło go ubywać w atmosferze, efekt cieplarniany zaczął słabnąć i Ziemia zaczęła się dramatycznie ochładzać. Gdyby wtedy istnieli ekolodzy i obrońcy środowiska, zaczęliby protestować: „Wstrzymać produkcję tlenu! Tlen zagraża Ziemi", ponieważ to była zmiana. Ziemia się ochłodziła i kilkakrotnie całkowicie zamarzła. W międzyczasie moc Słońca stopniowo wzrastała w miarę powolnej, trwającej miliardy lat ewolucji naszej gwiazdy. W rezultacie śnieżno-lodowe

epizody w życiu Ziemi się zakończyły, a obecność tlenu w atmosferze umożliwiła rozwój zróżnicowanych form życia, łącznie z człowiekiem. Nie wszystkie zmiany są jednakowo złe dla wszystkich organizmów.

Obawiamy się, że kolejna asteroida zmiecie nas z powierzchni Ziemi. I słusznie. Nie wiemy kiedy, ale wiemy, że to się zdarzy i to będzie zły dzień dla Ziemi. Poprzednie trafienie zdarzyło się 65 milionów lat temu, gdy asteroida zmiotła dinozaury. Na Ziemi żyli wtedy nasi przodkowie, ssaki o rozmiarach nie większych od gryzonia, kryjące się w leśnej ściółce przed potężnym tyranozaurem i innymi groźnymi drapieżnikami. Po uderzeniu asteroidy dinozaury wymarły, co pozwoliło ssakom wyewoluować w bardziej ambitne formy. Ta katastrofa uruchomiła ciąg zdarzeń, które ostatecznie umożliwiły i doprowadziły do powstania naszej obecnej kultury i cywilizacji. Asteroida dała nam życie, równocześnie zabierając je dinozaurom. Patrząc z tej perspektywy, jestem skłonny w bardziej holistyczny sposób postrzegać zmiany na Ziemi.

Implikacje tej historii są takie, że jeżeli chcesz nawiązać konwersację z istotami, które zamieszkują jakąś planetę, to nie wystarczy, że na owej planecie jest życie. To musi być życie inteligentne. I nawet to może nie wystarczyć. Isaac Newton bez wątpienia był inteligentny, ale nie mógłbyś nawiązać z nim konwersacji z drugiego końca Galaktyki, ponieważ nie dysponował technologią, która umożliwiłaby wysyłanie sygnałów na dużą odległość. Inteligentne życie, którego szukamy, musi być technologicznie zaawansowane w tej samej epoce, w której je obserwujemy. Inaczej mówiąc, jeżeli jest oddalone od nas o tysiąc lat świetlnych, to musiałoby wysyłać sygnały dokładnie tysiąc lat temu, aby dotarły do nas właśnie teraz. A teraz wyobraźmy sobie, że technologia może zawierać zalążki samozagłady. Załóżmy, że zaawansowana technologia w rękach ignorantów lub nieodpowiedzialnych liderów umożliwia samounicestwienie znacznie skuteczniej niż naturalne katastrofy. Ile czasu potrzebujemy, aby doprowadzić do samozagłady? To może być raptem jakieś sto lat. W takim razie rozglądając się po Galaktyce w poszukiwaniu kogoś, z kim mógłbyś pogawędzić, musisz liczyć na duży łut szczęścia, aby natrafić na zaledwie stuletni okres w historii owej planety krążącej wokół swej gwiazdy od 5 miliardów lat. Prawdopodobieństwo takiej koincydencji wygląda dość mizernie.

Frank Drake rozważył wszystkie takie argumenty i wstawił je do swego wzoru. To był początek programu poszukiwania pozaziemskiej inteligencji, znanej pod akronimem SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence). Drake chciał oszacować liczbę N_c komunikatywnych cywilizacji, których moglibyśmy nasłuchiwać teraz, w tej chwili. W tym celu wprowadził do swego wzoru wiele czynników (w większości ułamków), z których każdy reprezentuje oszacowanie jednej konkretnej liczby. Wszystkie oszacowania są oparte na współczesnych danych astronomicznych i astrofizycznych:

$$N_c = N_s \times f_{HP} \times f_L \times f_i \times f_c \times (L_c/L_G),$$

gdzie:

N_c — liczba komunikatywnych cywilizacji, które możemy dziś obserwować w Galaktyce;

N_s — liczba gwiazd w Galaktyce ~ 300 miliardów;

f_{HP} — ułamek odpowiednich gwiazd wraz z planetą w ekosferze ~ 0,006;

f_L — ułamek planet, na których rozwija się życie, nieznany, ale być może bliski 1;

f_i — ułamek planet, na których rozwija się inteligentne życie, nieznany, ale prawdopodobnie niewielki;

fc — ułamek planet z inteligentnym życiem, które rozwija technologię komunikowania się na odległości międzygwiezdne, nieznany, ale być może bliski 1;

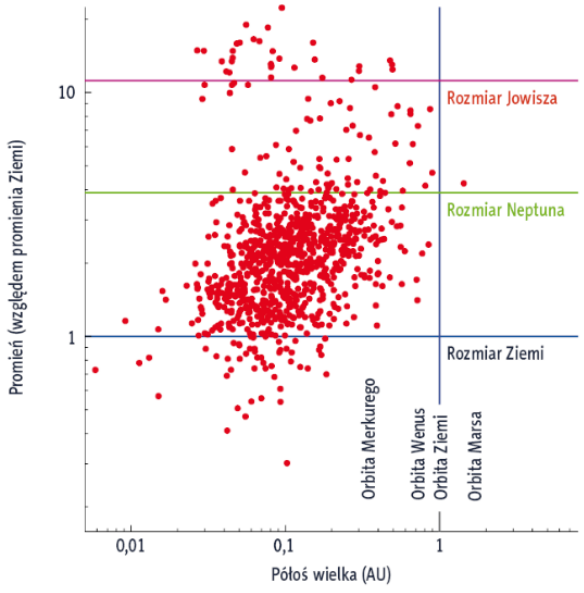
L_c — średni czas życia inteligentnej, komunikatywnej cywilizacji, nieznany, ale zapewne mały w porównaniu z wiekiem Galaktyki;

L_G — wiek Galaktyki ~ 10 miliardów lat.

Zacznijmy od liczby gwiazd w Drodze Mlecznej, około 300 miliardów. Ponieważ nie każda gwiazda w Galaktyce byłaby odpowiednia, musisz tę liczbę pomnożyć przez ułamek gwiazd, które długo żyły (wystarczająco długo, by rozwinąć inteligentne życie) i które mają planetę w strefie nadającej się do zamieszkania (f_{HP}). To zmniejsza całkowitą liczbę planet, gdzie moglibyśmy szukać inteligentnego życia. W momencie publikacji tej książki, po wytężonych wysiłkach zmierzających do zbadania ponad 150 tysięcy gwiazd, potwierdzono istnienie ponad 3 tysięcy egzoplanet. To poważna rewolucja.

Okazuje się, że posiadanie planety jest powszechne wśród gwiazd, a wiele gwiazd ma po kilka planet. Wśród gwiazd z planetami chcemy odkryć te gwiazdy, gdzie planeta krąży w ekosferze. Jedna z metod poszukiwania egzoplanet wykorzystuje efekt Dopplera. Krążąca wokół gwiazdy planeta oddziałuje grawitacyjnie ze swoją gwiazdą, co powoduje niewielkie zmiany prędkości radialnej gwiazdy, które możemy obserwować z Ziemi. Planety krążące wzdłuż mniejszej orbity (bliżej gwiazdy) mocniej szarpią swoją gwiazdę, powodując większe radialne wahanie prędkości gwiazdy, co z kolei jest łatwiejsze do wykrycia. Ta metoda jest skuteczna w poszukiwaniach planet krążących blisko swoich gwiazd, ale takie planety będą zbyt gorące, by mogły mieć ciekłą wodę, więc nie chcemy ich w równaniu Drake'a. Najwięcej egzoplanet wykrył satelita Kepler (nazwany oczywiście na cześć Johannesa Keplera), zbudowany i wysłany w kosmos przez NASA. Kepler odnajduje planety, mierząc niewielki spadek rejestrowanego światła gwiazdy. Światło słabnie w momencie, gdy planeta przechodzi bezpośrednio na tle gwiazdy, z punktu widzenia obserwatora. Takie przejście nazywamy tranzytem. Jowisz ma promień równy około 10% promienia Słońca. Jego powierzchnia przekroju (πr^2) wynosi około 1% powierzchni Słońca. Gdy planeta o rozmiarach Jowisza wykonuje tranzyt na tle swojej gwiazdy (zakładamy gwiazdę typu słonecznego), powoduje chwilowy spadek obserwowanej jasności gwiazdy o około 1%. Gdy planeta o rozmiarach Ziemi wykonuje taki tranzyt, spadek

obserwowanej jasności gwiazdy wynosi tylko 0,01%. Głównym celem misji Kepler było poszukiwanie planet podobnych do Ziemi, więc teleskop Kepler został tak zaprojektowany, że w zasadzie potrafił zarejestrować takie niewielkie spadki jasności, aczkolwiek była to granica jego możliwości. Wiele spośród wykrytych przez niego planet miało rozmiary Jowisza lub Saturna (nienadających się do podtrzymania znanych nam form życia), ale odkrył także wiele mniejszych planet, łącznie z planetami o rozmiarach zbliżonych do Ziemi. Ilustracja 10.1 przedstawia potwierdzone przez sondę Kepler planety jako kropki. Pionowa współrzędna danej kropki jest równa promieniowi planety, w skali równej promieniowi Ziemi. Pozioma współrzędna jest równa promieniowi orbity planety, w jednostkach AU. Większość odkrytych w ramach misji Kepler planet krąży wokół gwiazd typu słonecznego. Skrzyżowanie dwóch niebieskich linii wskazuje położenie na diagramie, w którym znalazłaby się Ziemia. Poszukujemy egzoplanet w pobliżu tego punktu.



ILUSTRACJA 10.1. Zmierzone promienie planet oraz odległości od macierzystych gwiazd dla egzoplanet odkrytych przez satelitę Kepler do lutego 2016 roku. Kropki ilustrują parametry ponad 1,1 tysiąca potwierdzonych egzoplanet. Pionowa współrzędna danej kropki jest równa promieniowi planety (w jednostkach równych promieniowi Ziemi). Pozioma współrzędna jest równa promieniowi orbity planety, w jednostkach astronomicznych, AU. Wszystkie te egzoplanety zostały odkryte, gdy wykonywały tranzyt na tle swojej gwiazdy, powodując nieznaczne osłabienie światła gwiazdy. Skrzyżowanie dwóch niebieskich linii wskazuje położenie na diagramie, w którym znalazłaby się Ziemia

Credit: Michael A. Strauss, NASA

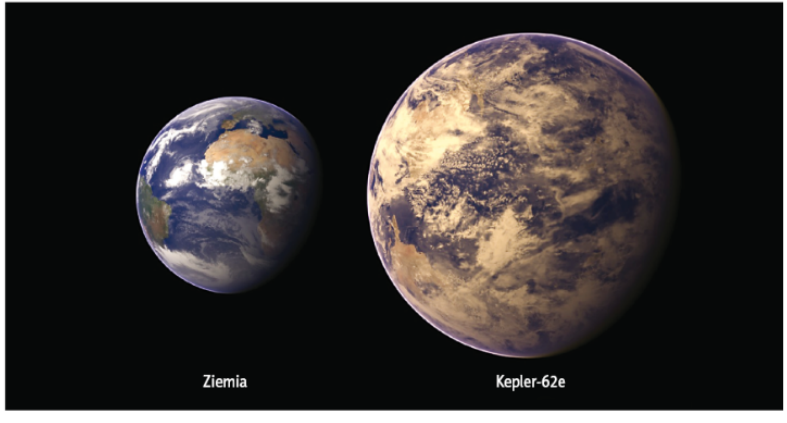
Tranzyty zdarzają się częściej, gdy planeta krąży blisko swojej gwiazdy, więc większość odkrytych przez satelitę Kepler planet jest za gorąca, aby podtrzymywać życie. Gdy planeta jest dostatecznie daleko od gwiazdy, aby panowała na niej znośna temperatura, płaszczyzna jej orbity musi się ustawić dokładnie w linii obserwacji, żebyśmy mogli zarejestrować tranzyt. Co więcej, okres obiegu jest dłuższy, więc tranzyty zdarzają się rzadziej, co zmniejsza nasze szanse ich zaobserwowania. Jak dotąd satelita Kepler znalazł około dziesięciu potwierdzonych egzoplanet o średnicy równej od jednej do dwóch średnic Ziemi i o natężeniu promieniowania w granicach czynnika 4 względem tego, co Ziemia dostaje ze Słońca. Liczba tych egzoplanet jest tak mała, ponieważ małe planety trudniej się wykrywa metodą tranzytu (małe planety trudniej się wykrywa dowolną metodą).

Jedną z obiecujących kandydatek jest planeta Kepler-62e (il. 10.2 przedstawia artystyczną wizję planety Kepler-62e). Jest to jedna z pięciu planet krążących wokół gwiazdy typu K (nazwanej Kepler-62), położonej około 1,2 tysiąca lat świetlnych od nas. Temperatura powierzchni tej gwiazdy jest równa 4900 K. Promień planety Kepler-62e jest równy 1,61 promienia Ziemi. Otrzymuje ona tylko o 20% więcej promieniowania (na metr kwadratowy) od swojej gwiazdy, w porównaniu z promieniowaniem, jakie Ziemia otrzymuje ze Słońca. Powinna zatem znajdować się w ekosferze. Może być planetą skalistą lub lodową, z oceanem pokrywającym jej powierzchnię. Układ planetarny gwiazdy Kepler-62 jest mniej więcej 2,5 miliarda lat starszy niż nasz Układ Słoneczny.

Jaki ułamek gwiazd (f_{HP}) ma planetę w ekosferze? Gwiazdy typu G, takie jak nasze Słońce, stanowią prawie 8% całkowitej liczby gwiazd w Drodze Mlecznej. Wiemy, że nadają się na siedlisko życia, ponieważ Słońce jest jedną z nich. Gwiazdy o znacznie większej mocy od Słońca zużywają swoje paliwo zbyt szybko, aby dać swoim planetom czas na ewolucję złożonego, inteligentnego życia, co na Ziemi wymagało miliardów lat. Słabsze gwiazdy, typu K lub M, żyją jeszcze dłużej niż Słońce, więc łatwo mogą spełnić ten warunek.

Gwiazdy typu M na ciągu głównym mają tak niską moc, że planeta musiałaby krążyć bardzo blisko, aby zmieścić się w ekosferze. W takim przypadku zachodzi zjawisko zwane rotacją synchroniczną — siły pływowe wymuszają lekko eliptyczny kształt planety, jej rotacja zostaje spowolniona, aż w końcu rotacja planety wokół własnej osi zostaje zablokowana w położeniu, w którym oś elipsoidy jest cały czas skierowana w stronę gwiazdy. Siły pływowe są tym silniejsze, im mniejsza jest odległość (z tego samego powodu nasz Księżyc wykonuje rotację synchroniczną, z jedną stroną cały czas skierowaną ku Ziemi). Samej planecie prawdopodobnie nie robi to różnicy, ale jakiekolwiek formy życia na jej powierzchni musiałyby stawić czoło niezbyt sprzyjającym warunkom: strona planety skierowana ku gwieździe byłaby zbyt gorąca; przeciwna strona planety byłaby zbyt zimna. Atmosfera podobna do atmosfery ziemskiej zamarzłaby na zimnej stronie. Atmosfera na gorącej stronie rozszerzałaby się pod wpływem temperatury, uciekałaby na zimną stronę i tam także by zamarzała. Ostatecznie cała atmosfera zamarzłaby na zimnej stronie, nie dając życiu szans. Jedyna nadzieja dla życia na takiej

planecie polegałaby na tym, iż atmosfera jest na tyle gruba, że powietrze może cyrkulować — krążyć po obu stronach, redukując duże różnice temperatury. Taka atmosfera miałaby bardzo wysokie ciśnienie na powierzchni planety. Co więcej, gigantyczne rozbłyski (słoneczne) są znacznie częstsze na powierzchni gwiazd typu M niż na gwiazdach podobnych do Słońca, co może się okazać zabójcze dla życia. Wszystkie powyższe czynniki być może nie wykluczają życia, lecz stwarzają trudniejsze warunki dla ewolucji życia. Dlatego najlepszymi kandydatami są gwiazdy typu G i K, które łącznie stanowią poważne 20% całkowitej liczby gwiazd w Drodze Mlecznej.



ILUSTRACJA 10.2. Kepler-62e w porównaniu z Ziemią. Kepler-62e stanowi artystyczną wizję, lecz względne rozmiary są poprawne. Jej orbita prawdopodobnie mieści się w ekosferze, a zatem może mieć wodne oceany

Photo credit: PHL@UPRArecibo

Jaka jest szansa na znalezienie planety w ekosferze takiej gwiazdy?

Mam zamiar pokazać ci teraz jeden z najpiękniejszych rachunków w całym kosmosie, aczkolwiek powinieneś może sam to ocenić. Chcę tylko pokazać, że jesteś wyposażony we wszystkie narzędzia niezbędne do wykonania tych rachunków. Słońce ma określoną moc. Ziemia także ma określoną moc. Ma temperaturę. Mając określoną temperaturę, Ziemia emituje promieniowanie — zwane promieniowaniem termicznym — głównie w podczerwonym zakresie widma. Ziemia ma określoną temperaturę, więc widmo jej promieniowania ma rozkład określony przez krzywą Plancka odpowiadającą tej temperaturze. Całkowita moc Ziemi jest równa energii emitowanej przez jednostkową powierzchnię pomnożoną przez całkowite pole powierzchni planety. Weźmy zatem pole powierzchni, $4\pi r_E^2$ i pomnóżmy przez energię emitowaną przez jednostkową powierzchnię Ziemi, σT_E^4, (zgodnie z prawem Stefana-Boltzmanna dla promieniowania termicznego). Moc Ziemi wynosi zatem $L_E = 4\pi r_E^2 \sigma T_E^4$. Taki sam rachunek możemy wykonać dla Słońca: $L_S = 4\pi r_S^2 \sigma T_S^4$. Pytamy teraz, jaka część tej słonecznej energii dociera do Ziemi. Temperatura Ziemi jest wprawdzie zmienna, ale zmienia się wokół stałej wartości średniej. W warunkach równowagi energia, jaką Ziemia otrzymuje ze Słońca, powinna być równa energii emitowanej z powierzchni Ziemi. W przeciwnym razie Ziemia raptownie by się ogrzewała lub ochładzała, a przecież widzimy, że utrzymuje stałą średnią temperaturę. Widzieliśmy już te

równania, lecz teraz mam dla nich inne zadanie — obliczenie równowagowej temperatury Ziemi.

Całkowita energia emitowana przez Słońce (moc Słońca), L_S, nie trafia w całości w Ziemię, lecz przenika przez sferyczną powierzchnię o promieniu równym promieniowi orbity Ziemi (1 AU). Interesuje nas tylko ta część tej energii, która trafi w Ziemię. Chcemy obliczyć, jaki ułamek tej sferycznej powierzchni zasłania Ziemia. Ten mały fragment całej powierzchni to tak zwany przekrój czynny Ziemi.

Ułamek energii Słońca, który trafia w Ziemię, jest zatem równy polu owego przekroju czynnego, πr_E^2, podzielonemu przez pole powierzchni całej sferycznej powierzchni o promieniu 1 AU, przez którą przenika promieniowanie Słońca, czyli $4\pi(1\ \mathrm{AU})^2$. Całkowita energia, która ze Słońca dociera do Ziemi, wynosi zatem $L_S\,\pi r_E^2/4\pi(1\ \mathrm{AU})^2$, lub po podstawieniu, wykorzystując nasz wzór na moc Słońca, $4\pi r_S^2\sigma T_S^4\ \pi r_E^2/4\pi(1\ \mathrm{AU})^2$. Jeżeli Ziemia jest w równowadze, mogę to wyrażenie porównać do całkowitej mocy Ziemi, $4\pi r_E^2\sigma T_E^4$. W rezultacie dostajemy równanie: $4\pi r_S^2\sigma T_S^4\ \pi r_E^2/4\pi\ (1\ \mathrm{AU})^2 = 4\pi r_E^2\sigma T_E^4$. Po lewej stronie jest ułamek $4\pi/4\pi$, który się uprości. Po obu stronach występuje wyrażenie πr_E^2, które się także uprości; σ również jest po obu stronach i również się uprości. Ostatecznie równanie sprowadza się do: $r_S^2 T_S^4/(1\ \mathrm{AU})^2 = 4T_E^4$.

Możemy teraz obliczyć równowagową temperaturę Ziemi, T_E. Po pierwsze, zapiszę to równanie w takiej postaci: $T_E^4 = r_S^2 T_S^4/4(1\ \mathrm{AU})^2$; a następnie wyciągnę pierwiastek czwartego stopnia z obu stron:

$$T_E = T_S\sqrt{[r_S/(2\ \mathrm{AU})]}.$$

To najprostsza forma tego równania, ale właśnie tego potrzebujemy. Podstawmy do równania liczby: promień Słońca jest równy 696 000 km, a 2 AU = 300 000 000 km. Dzielimy promień Słońca przez 2 AU, 696 000 km / 300 000 000 km. Ile to wynosi? 0,00232. Ile wynosi pierwiastek kwadratowy z tej liczby? 0,048. Jaka jest temperatura powierzchni Słońca? 5778 K. Pomnóżmy 5778 K przez 0,048, a dostaniemy równowagową temperaturę powierzchni Ziemi. Ile wyszło? 278 K. Pamiętamy, że temperatura zamarzania wody wynosi 273 K albo 0 °C, czyli nasze oszacowanie temperatury Ziemi daje 5 °C (albo 41 °F). Średnia temperatura powierzchni Ziemi jest faktycznie bliska tej wartości. Ale chwileczkę, jest jeszcze coś, czego nie uwzględniłem. Potraktowałem Ziemię, jakby była ciałem doskonale czarnym, ale w rzeczywistości Ziemia nie absorbuje całej energii, która do niej dociera, ponieważ w atmosferze występują białe chmury, a na biegunach śnieżne czapy lodowe (o dużych wartościach współczynnika odbicia), które odbijają część promieni Słońca. Okazuje się, że Ziemia odbija z powrotem w przestrzeń 40% energii, która trafia w naszą planetę. Taka ilość energii nie zostaje zaabsorbowana, a zatem nie przyczynia się do wzrostu

temperatury Ziemi. Jeżeli uwzględnimy to w równaniu, równowagowa temperatura powierzchni Ziemi zmniejszy się, a jeśli policzysz dokładnie, równowagowa temperatura powierzchni Ziemi spadnie poniżej zera. Tak, to miałem na myśli — naturalna, równowagowa temperatura Ziemi w naszej odległości od Słońca jest poniżej punktu zamarzania wody. Z naszych poprzednich rozważań powinno zatem wynikać, że na Ziemi nie ma ciekłej wody i nie powinno istnieć życie, ale oczywiście woda jest i życia jest pełno. Zatem jest jeszcze jakiś czynnik, który podnosi temperaturę. Zgadłeś: efekt cieplarniany. Promieniowanie podczerwone emitowane przez powierzchnię Ziemi nie ucieka od razu w przestrzeń, lecz jest absorbowane przez atmosferę, co podnosi temperaturę atmosfery, jak opisaliśmy w rozdziale 2. W rezultacie rośnie także temperatura powierzchni Ziemi. Efekt cieplarniany w atmosferze powoduje wzrost temperatury powierzchni Ziemi. Okazuje się, że efekt cieplarniany w przybliżeniu kompensuje skutki współczynnika odbicia Ziemi i w rezultacie wynik naszych obliczeń jest bliski rzeczywistej temperaturze powierzchni planety.

Nasze piękne równanie, $T_E = T_S\sqrt{[r_S/(2\ \mathrm{AU})]}$, pozwala także obliczyć, że dla danej gwiazdy temperatura jej planety (o określonym współczynniku odbicia oraz z uwzględnieniem efektu cieplarnianego) będzie proporcjonalna do odwrotności z pierwiastka kwadratowego z odległości planety od gwiazdy. Równanie pozwala obliczyć wewnętrzną i zewnętrzną granicę ekosfery dla tej konkretnej planety; promienie tych granic nazwijmy r_{min} i r_{max}. Na wewnętrznej granicy ekosfery, w odległości r_{min} od gwiazdy, woda prawie gotuje się na powierzchni planety. Jeśli jej ciśnienie atmosferyczne jest takie jak na Ziemi, woda wrze w temperaturze 100 °C, czyli 373 K. W r_{min}, przy wewnętrznej granicy ekosfery, planeta ma temperaturę powierzchni równą 373 K. Woda zamarza w temperaturze 0 °C lub 273 K — z zamarzaniem mamy do czynienia na zewnętrznej granicy ekosfery. Tak więc planeta na wewnętrznej granicy ekosfery jest gorętsza niż ta sama planeta na zewnętrznej granicy ekosfery o współczynnik 373/273. Stosunek r_{max}/r_{min} będzie równy kwadratowi z (373/273), czyli 1,87. Zatem zewnętrzna granica ekosfery dla tej konkretnej planety jest tylko o 87% większa niż granica wewnętrzna. To dość wąski zakres.

Po uwzględnieniu efektów selekcji w danych obserwacyjnych dane z sondy Kepler mówią nam, że około 10% gwiazd typu słonecznego (G i K) ma planetę wielkości Ziemi (z promieniem między jeden a dwa razy większym od promienia Ziemi), ze strumieniem promieniowania gwiazdy w granicach między 1/4 i cztery razy więcej niż Ziemia otrzymuje od Słońca. Tak więc około 10% gwiazd podobnych do Słońca miałoby planety wielkości Ziemi w odległości od 0,5 AU do 2 AU od gwiazdy. Wynika to z faktu, że natężenie promieniowania słonecznego spada jak odwrotność kwadratu odległości. Planeta w odległości 2 AU otrzymuje 1/4 uzyskanej przez Ziemię energii słonecznej, a planeta w odległości 0,5 AU otrzymuje cztery razy więcej światła swojej gwiazdy w porównaniu z promieniowaniem słonecznym, które otrzymuje Ziemia. Dane z misji Kepler sugerują, że odległości planet o rozmiarach zbliżonych do Ziemi od ich macierzystych gwiazd są rozłożone

równomiernie w funkcji logarytmu odległości. Co to znaczy? Dla planet położonych między 0,5 AU i 2 AU spodziewamy się, że połowa będzie między 0,5 AU i 1 AU, a druga połowa między 1 AU i 2 AU. Rozpiętość od 0,5 AU do 1 AU daje czynnik 2. Współczynnik rozpiętości od 1 AU do 2 AU jest również równy 2. Jednakowa liczba planet znajduje się w odstępach z jednakowymi czynnikami. Planeta w odległości 0,5 AU od gwiazdy typu słonecznego mogłaby nadawać się do zamieszkania, gdyby miała wysoki współczynnik odbicia i niski efekt cieplarniany. Ale jeśli umieścisz tam Ziemię, jej oceany zagotują się. Jeśli natomiast umieścisz Ziemię w odległości 2 AU, to zamarznie. Jeśli jednak wstawisz tam planetę o niskim współczynniku odbicia i silnym efekcie cieplarnianym, może tam być wystarczająco ciepło, aby podtrzymać życie. Stosunek r_{max}/r_{min} dla danej planety, biorąc pod uwagę jej konkretny współczynnik odbicia i efekt cieplarniany, daje dość wąski zakres: 1,87. A teraz policzmy coś takiego: $1{,}87^{2{,}2} \approx 4$. Czyli czynnik 1,87 trzeba podnieść do potęgi 2,2 (w przybliżeniu), aby otrzymać współczynnik 4, czyli cały zakres od 0,5 AU do 2 AU dla gwiazdy typu słonecznego. Jeśli jednakowa liczba planet trafia w każdy z tych zakresów określonych przez czynnik 1,87, to znaczy, że jeśli jesteś przypadkową planetą wielkości Ziemi, gdzieś pomiędzy 0,5 AU a 2 AU, to istnieje około jednej szansy na 2,2 (lub około 45%), że przez przypadek znajdziesz się w zakresie $r_{max}/r_{min} = 1{,}87$ i będziesz się nadawać do zamieszkania, biorąc pod uwagę twój konkretny współczynnik odbicia i efekt cieplarniany.

Jeżeli 20% gwiazd w Galaktyce się nadaje — gwiazdy typu G i K — i około 10% takich gwiazd (typu słonecznego) ma planety o rozmiarach zbliżonych do Ziemi, z promieniowaniem „słonecznym” w zakresie między 1/4 i 4 tego, co Ziemia otrzymuje od Słońca, i na dodatek około 45% tych planet znajduje się w zakresie odległości sprzyjającym istnieniu życia (ciekła woda na powierzchni przy określonym współczynniku odbicia i efekcie cieplarnianym), to ułamek $f_{HP} = 0{,}2 \times 0{,}1 \times 0{,}45 = 0{,}009$.

To było wyczerpujące i zarazem pouczające ćwiczenie rachunkowe. Użyliśmy matematyki i astrofizyki, aby wyselekcjonować położenia wokół gwiazd, gdzie moglibyśmy znaleźć życie w takiej formie, w jakiej je znamy.

Aby planeta była odpowiednią kandydatką, musi jeszcze spełniać pewne dodatkowe warunki. Musi mieć przyzwoitą atmosferę. Jeżeli planeta jest mała, jak nasz Księżyc, to jej grawitacja jest na tyle słaba, że cząsteczki powietrza w atmosferze, w temperaturze 278 K, uciekną w przestrzeń i planeta straci swą atmosferę. Z tego powodu Księżyc praktycznie nie ma żadnej atmosfery. Ale rozważamy przecież planety o rozmiarach od jeden do dwóch razy większych od Ziemi, więc im nie grozi utrata atmosfery. Orbita planety nie może być zbyt ekscentryczna. Jeżeli mimośród (ekscentryczność) dla Keplerowskiej orbity wynosi e, to stosunek maksymalnej odległości od macierzystej gwiazdy r_{max} do minimalnej odległości od gwiazdy r_{min} wynosi $r_{max}/r_{min} = (1+e)/(1-e)$. Można stąd wyliczyć $e = ([r_{max}/r_{min}] - 1)/([r_{max}/r_{min}] + 1)$. Z tych wzorów wynika, że jeżeli orbita jest idealnym okręgiem, to mimośród $e = 0$. Jeżeli natomiast orbita jest bardzo wydłużona, mimośród $e = 1$ (co dotyczy wielu

komet). Domyślasz się, dokąd to rozumowanie zmierza: orbita planety nie może mieć mimośrodu, przy którym $r_{max}/r_{min} > 1{,}87$, ponieważ oceany będą naprzemiennie gotować się i zamarzać. Oznacza to, że mimośród musi spełniać warunek $e < 0{,}30$, aby planeta nigdy nie opuściła ekosfery i nie zagotowała ani nie zamroziła swojej cennej ciekłej wody. Jeżeli spotkasz kiedyś pozaziemską istotę, możesz powiedzieć: „założę się, że mimośród twojej macierzystej planety jest mniejszy od 0,30". Bez wątpienia będzie on lub ona, lub — co najbardziej prawdopodobne — ono pod wielkim wrażeniem.

Mimośród orbity Ziemi jest równy zaledwie $e = 0{,}017$. To nie przypadek — dzięki temu mamy sprzyjający klimat bez szalonych fluktuacji. Lub, ujmując to nieco bardziej precyzyjnie, to nie przypadek, że wyewoluowaliśmy na planecie z małą wartością mimośrodu. Większość ziemiopodobnych planet, odkrytych przez sondę Kepler, ma małe wartości mimośrodu, co jest sprzyjającą okolicznością z punktu widzenia poszukiwania życia. Te planety często pojawiają się w układach multiplanetarnych, gdzie orbitalne oddziaływania między planetami stopniowo zaokrąglają ich orbity. Orbity stabilizują się w taki sposób, że planety nie zbliżają się do swoich sąsiadów. Satelita Kepler znalazł wiele układów multiplanetarnych, w których okres orbitalny każdej kolejnej planety jest — średnio rzecz biorąc — większy od okresu poprzednika o czynnik co najmniej 2. Stosując trzecie prawo Keplera ($P^2 = a^3$), możemy obliczyć, że rozmiar orbity kolejnej planety jest — średnio rzecz biorąc — większy od rozmiaru orbity poprzednika o czynnik co najmniej $2^{2/3}$, czyli 1,6. To nieco mniej niż $1{,}87 = r_{max}/r_{min}$, czyli szerokość ekosfery, więc jakaś szczęśliwa gwiazda może mieć dwie planety w ekosferze, jeżeli mają nieco mniejszy rozstaw orbit, albo ewentualnie jedna z nich ma duży współczynnik odbicia i słaby efekt cieplarniany, a druga odwrotnie — mały współczynnik odbicia i silny efekt cieplarniany. Ale średnio rzecz biorąc, spodziewamy się co najwyżej jednej planety w ekosferze.

Kiedyś uważano, że układy podwójne gwiazd nie mają planet. Ponad połowa gwiazd w Galaktyce znajduje się w układach podwójnych, więc to zmniejszyłoby liczbę kandydatów o czynnik 2. Ale satelita Kepler znalazł planety w układach podwójnych gwiazd. Jeżeli dwie gwiazdy typu słonecznego krążą wokół siebie w odległości 0,1 AU, a twoja planeta krąży wokół nich w odległości $\sqrt{2}$ AU = 1,41 AU, to twoja ekosfera jest w porządku. Otrzymujesz tyle samo promieniowania, ile my dostajemy na Ziemi, a na niebie masz dwa słońca (jak planeta Tatooine w *Star Wars IV*). Dwa słońca tworzą na tyle zwarty układ, że to nie zaburza twojej dynamiki. Ale jeżeli dwie gwiazdy typu słonecznego krążą wokół siebie w odległości 1 AU, to będzie trudno znaleźć ekosferę ze stabilną orbitą dla twojej planety, ponieważ twoje grawitacyjne przyporządkowanie będzie okresowo przerzucane od jednej gwiazdy do drugiej. Jeżeli natomiast dwie gwiazdy typu słonecznego krążą wokół siebie w odległości większej niż 10 AU, to ponownie nie jest źle, ponieważ możesz krążyć wokół jednej z gwiazd w odległości 1 AU, a drugą będziesz widział bardzo daleko. Z tak dużej odległości nie będzie zaburzać twojej orbity ani nie spowoduje, że twoja planeta będzie zbyt gorąca. Nie chcesz oczywiście znaleźć się w układzie, w którym choćby jedna gwiazda ma

dużą masę, ponieważ stanie się czerwonym olbrzymem i umrze, zanim będziesz miał dość czasu, aby na twojej planecie wyewoluowała inteligencja.

Te trzy dodatkowe czynniki — atmosfera, mimośród i problemy w układach podwójnych — zmniejszają prawdopodobieństwo posiadania planety w ekosferze, ale prawdopodobnie nie zmniejszą ułamka f_{HP} o czynnik większy niż 2, więc zmniejszymy go tylko trochę, od 0,009 do 0,006.

Gdy Frank Drake po raz pierwszy ogłosił swoje równanie w latach sześćdziesiątych, nie odkryliśmy jeszcze ani jednej planety poza Układem Słonecznym, więc nie mieliśmy pojęcia, jaka może być wartość ułamka f_{HP}. Obecnie mamy sporo danych, które pozwalają uściślić nasze oszacowania. Właśnie tak powinno to równanie funkcjonować — zachęcać nas do poszukiwania danych i obliczania czynników.

Wynik $f_{\mathrm{HP}} \sim 0{,}006$ jest zachęcający. Sprawdźmy, co możemy z nim zrobić. Najbliższa gwiazda znajduje się w odległości 4 lat świetlnych. Idźmy dziesięć razy dalej, na odległość 40 lat świetlnych. Sfera o promieniu 40 lat świetlnych ma objętość tysiąc razy większą od sfery o promieniu 4 lat świetlnych, więc znajduje się w niej około tysiąca gwiazd. Z czynnikiem $f_{\mathrm{HP}} \sim 0{,}006$ spodziewamy się, że w promieniu 40 lat świetlnych co najmniej sześć planet krąży w ekosferze swojej gwiazdy. Tak, w odległości 40 lat świetlnych od Słońca spodziewamy się znaleźć nadające się do zamieszkania planety krążące wokół innych gwiazd! To znaczy, że odcinki pierwszej serii *Star Treka,* rozchodzące się z prędkością światła z nadajnika telewizji NBC, prawdopodobnie dotarły już do odbiorników na jakiejś zamieszkiwalnej planecie z ciekłą wodą na powierzchni.

W latach siedemdziesiątych Brytyjskie Towarzystwo Międzyplanetarne (British Interplanetary Society) przeprowadziło badanie, nazwane Projekt Dedal (Project Daedalus), dotyczące możliwości zbudowania statku międzygwiezdnego. Dwuczłonowy statek miałby 190 metrów wysokości, miał być napędzany energią jądrową pochodzącą ze spalania 50 tysięcy ton deuteru i helu-3. To dwa razy większa wysokość i szesnaście razy większa masa od rakiety Saturn V, której użyliśmy, aby wysłać astronautów na Księżyc. Ta ogromna rakieta miałaby się rozpędzić do prędkości równej 12% prędkości światła. Miała unieść 500 ton instrumentów, łącznie z dwoma 5-metrowymi teleskopami optycznymi oraz dwoma 20-metrowymi radioteleskopami. Aby dolecieć na odległość 40 lat świetlnych, potrzebowałaby trzystu trzydziestu trzech lat. Przy naszej obecnej wiedzy możemy stwierdzić, że w ciągu tego czasu mogłaby natrafić na zamieszkiwalną planetę. Sygnały telemetrii wróciłyby na Ziemię po kolejnych czterdziestu latach, więc dowiedzielibyśmy się o przelocie w pobliżu planety po trzystu siedemdziesięciu trzech latach.

Jeszcze lepszym pomysłem byłoby użycie materii i antymaterii jako źródła energii. Utrzymanie materii i antymaterii w bezpiecznej odległości — zanim zostaną połączone w silnikach — to poważne wyzwanie inżynieryjne, lecz takie rozwiązanie pozwoliłoby zamienić 100% masy paliwa w energię, dzięki równaniu Einsteina, $E = mc^2$. To znacznie bardziej wydajna metoda napędu w porównaniu ze spalaniem deuteru i helu-3, z których powstaje wodór oraz

hel-4, i tylko 0,5% masy paliwa jest zamieniane w energię. Wykorzystując materię i antymaterię jako paliwo, rakieta o takich samych rozmiarach mogłaby zabrać na pokład dziesięciu astronautów i posadzić ich na zamieszkiwalnej planecie 40 lat świetlnych stąd. Początkowo rakieta rozpędzałaby się z przyspieszeniem 1 g (9,8 metra na sekundę na sekundę, grawitacyjne przyspieszenie, którego doświadczamy na Ziemi) w ciągu 4,93 roku, wykorzystując materię i antymaterię jako paliwo. Takie przyspieszenie zapewniłoby załodze odpowiedni komfort — mogliby chodzić po pokładzie tam samo jak na Ziemi. Statek rozpędziłby się do prędkości 98% prędkości światła, a następnie z prędkością 98% prędkości światła poruszałby się przez kolejne 32,65 roku. Pod koniec podróży musiałby odwrócić dysze silników i przez 4,93 roku zwalniałby z przyspieszeniem/opóźnieniem 1 g, po czym wyhamowałby całkowicie i po 42,5 roku od startu dotarłby do celu. Dzięki efektom relatywistycznym (o których Rich opowie w rozdziałach 17 i 18), poruszając się z prędkością bliską prędkości światła, astronauci postarzeliby się tylko o 11,1 roku w trakcie podróży, podczas gdy na Ziemi upłynęłoby 42,5 roku. Nawet gdyby technologia wykorzystująca materię i antymaterię pojawiła się dopiero po dwóch stuleciach (od startu rakiety z napędem jądrowym), rakieta napędzana antymaterią nadal wyprzedziłaby rakietę jądrową.

Aby wszystkie te kalkulacje miały sens, musimy najpierw znaleźć planetę w ekosferze. Czterdzieści lat świetlnych to 12 parseków. Planeta krążąca wzdłuż orbity o promieniu 1 AU wokół gwiazdy odległej od nas o 40 lat świetlnych będzie widoczna na niebie pod kątem 1/12 sekundy kątowej względem swojej gwiazdy. Rozdzielczość Kosmicznego teleskopu Hubble'a, o średnicy 2,4 metra, wynosi 0,1 sekundy kątowej. Teleskop kosmiczny o średnicy 12 metrów będzie miał rozdzielczość 1/50 sekundy kątowej. Jeżeli jasne światło gwiazdy zostanie zablokowane przez specjalną przesłonę zaprojektowaną tak, aby zminimalizować efekty rozpraszania światła gwiazdy, to taki teleskop mógłby w zasadzie znaleźć planetę odległą o 1/12 sekundy kątowej od swojej gwiazdy. Kosmiczny Teleskop Jamesa Webba, który NASA zamierza wysłać na wokółsłoneczną orbitę w 2018 roku[12], ma mieć składane lustro o docelowej średnicy 6,5 metra. Następna generacja teleskopów może być zdolna do znajdowania i wykonywania zdjęć ziemiopodobnych planet w ekosferach z odległości 40 lat świetlnych. Może będą zielone, jeżeli mają roślinność. Może będą niebieskie, jeżeli mają oceany. Możemy zbadać widmo ich promieniowania i sprawdzić, czy w atmosferze jest tlen — swego rodzaju biomarker, produkt uboczny fotosyntezy i innych reakcji chemicznych, które mogą świadczyć o istnieniu życia.

Jeżeli pomnożysz liczbę gwiazd w Galaktyce (300 miliardów) przez f_{HP} (0,006), otrzymasz ładną liczbę — liczbę planet w ekosferze: 1,8 miliarda. To ogromna liczba, ale nie wszystkie planety się liczą. Wśród planet, które leżą w ekosferze szukamy tego ułamka f_L planet, na których istnieje życie. Ale nie byle jakie, lecz inteligentne życie. Jaki ułamek f_i planet jest siedliskiem inteligentnego życia? Wśród planet, na których istnieje jakiekolwiek życie,

szukamy tego ułamka f_i planet, na których istnieje inteligentne życie. Za chwilę wrócimy do tych elementów równania.

I co dalej? Mamy ułamek długo żyjących gwiazd z planetami krążącymi w ekosferze, na których istnieje inteligentne życie, a wśród nich jest ułamek f_c tych, na których rozwinie się technologia zdolna do komunikowania się na odległości międzygwiezdne.

Ostatni czynnik w równaniu Drake'a to ułamek komunikatywnych cywilizacji, które wysyłały sygnały w tej epoce, którą my teraz obserwujemy. To ułamek czasu w trakcie istnienia Galaktyki, gdy te cywilizacje były „włączone" i „nadawały". Jeżeli będziemy spoglądać losowo w różne strony Galaktyki, to znajdziemy planety, które właśnie się narodziły, znajdziemy planety w średnim wieku oraz takie, które są już stare. Prawdopodobieństwo odkrycia jakiejś planety w trakcie jej komunikatywnej fazy jest równe średniej długości istnienia cywilizacji dysponującej technologią komunikacji radiowej podzielonej przez wiek (czas istnienia) Galaktyki. To kolejny ułamek. Nasz ostatni ułamek. Mnożąc wszystkie te ułamki po kolei, mnożąc całość przez liczbę gwiazd, dostajemy N_c, liczbę cywilizacji w Galaktyce, których sygnały możemy odebrać... teraz.

I w tym tkwi sens i istota równania Drake'a. Niektóre ułamki dobrze znamy. Na przykład wiemy, jaki ułamek gwiazd długo żyje, na podstawie tego, co widzimy na ciągu głównym na diagramie HR. Rozejrzeliśmy się dookoła i odkryliśmy mnóstwo planet. Jak dotąd wszystko działa. Jaki ułamek tych planet ma rozmiary zbliżone do Ziemi i krąży w ekosferze? Właśnie to oszacowaliśmy na podstawie statystycznych danych z satelity Kepler. Całkiem nieźle nam idzie.

Odkryliśmy także lukę w rozumowaniu dotyczącym ekosfery. Europa, księżyc Jowisza, ma głęboki na 80 kilometrów wodny ocean pod warstwą lodu o grubości 10 kilometrów. Jak już wspomniałem, w oceanach Europy jest więcej wody niż we wszystkich oceanach Ziemi razem wziętych. A przecież Europa jest daleko poza ekosferą Słońca. Skąd wzięła tyle ciepła? Europa krąży wokół Jowisza wraz z trzema innymi księżycami. Zgodnie z prawami Newtona księżyce nawzajem zaburzają swoje orbity, czasami popychając Europę bliżej Jowisza, a czasami dalej. Gdy Europa jest bliżej Jowisza, grawitacyjne oddziaływania Jowiszowych pływów ugniatają biedny księżyc, nadając mu bardziej wydłużony kształt. Gdy Europa jest dalej od Jowisza, rozluźnia się i przybiera bardziej kulisty kształt. Takie regularne ugniatanie Europy powoduje ogrzewanie jej wnętrza, roztapiając lód i utrzymując ciekłą wodę w jej oceanie. Ktoś mógłby wydać parę dolarów, wysłać na Europę próbnik, który przewierciłby otwór w lodowej pokrywie, aby spróbować wędkowania w przeręblu (można wysłać małą sondę ogrzewaną plutonem, która przedostałaby się do oceanu, wytapiając sobie drogę przez lód). Jeżeli znajdzie tam jakieś formy życia, będziemy musieli o nich mówić per „Europejczycy"! Enceladus, księżyc Saturna, także ma ocean pod warstwą lodu. Jeżeli zatem oszacujemy ułamek f_{HP}, licząc planety ogrzewane przez ich własne gwiazdy, musimy zwiększyć wynik w jakiś sensowny sposób, aby uwzględnić ogrzewane przez pływy księżyce, takie jak Europa, żyjące daleko

poza ekosferą, lecz mimo to utrzymujące ciekłą wodę. Musimy rozszerzyć znaczenie pojęcia ekosfera.

Jaki ułamek tych nadających się do zamieszkania miejsc jest rzeczywiście zamieszkany? Ile wynosi f_L? Nasza jedyna przesłanka — jedyna liczba — pochodzi z Ziemi. Biolodzy przechwalają się różnorodnością życia na Ziemi, ale podejrzewam, że jeżeli napotkamy jakąś pozaziemską istotę, to będzie się bardziej różniła od istot na Ziemi niż jakiekolwiek dwa gatunki na Ziemi różnią się między sobą.

Jaka właściwie jest ta różnorodność życia na Ziemi? Ustawmy się w szeregu — całkiem niezłe zoo. Tu mała bakteria, tam jeszcze mniejszy wirus, meduza (słyszałem, że ostatnio jest zwana galaretką), homar, niedźwiedź polarny. A oto inny przykład. Przypuśćmy, że nigdy nie byłeś na Ziemi, a ktoś z twoich znajomych, kto właśnie ją odwiedził, podekscytowany tym, co widział, opowiada: „właśnie widziałem egzotyczną formę życia. Znajduje swoje ofiary, rejestrując promienie podczerwone. Nie ma nóg ani rąk, ale poluje i jest śmiertelnie groźnym drapieżnikiem. I wiesz co? Potrafi zjeść istotę pięć razy większą niż jego własna głowa". Kręcisz własną głową z niedowierzaniem i mówisz: „Nie bujaj". Ale co ja właśnie opisałem? Węża. Wąż nie ma nóg ani rąk, ale świetnie — jak na węża — daje sobie radę w życiu, rozciągając szeroko szczęki i zjadając rzeczy większe niż jego własna głowa.

Co jeszcze? Dęby. I ludzie. Chodzi mi o to, że cała ta różnorodność mieszka na jednej planecie. Mamy wspólne DNA, czy nam się to podoba czy nie. Wszystkie żywe istoty na Ziemi mają pewien procent DNA wspólny z innymi żywymi istotami. Jesteśmy wszyscy połączeni — chemicznie i biologicznie.

Ziemia ma teraz około 4,6 miliarda lat. W początkowym okresie powstawania Układu Słonecznego resztki pozostałe z fazy formowania planet siały spustoszenie na powierzchniach planet. Duże skały i lodowe kule wciąż spadały z nieba, deponując ogromne ilości energii. Ich energia kinetyczna zamieniała się w ciepło, roztapiając powierzchnie skalistych planet i tym samym sterylizując je. To trwało około 600 milionów lat. Jeżeli chcesz uruchomić zegar życia na Ziemi, nie rób tego 4,6 miliarda lat temu, ponieważ powierzchnia Ziemi była wtedy wyjątkowo nieprzyjazna dla życia. Jeżeli chcesz się przekonać, jak szybko życie się uformowało, nie zaczynaj wtedy, lecz zacznij około 4 miliardów lat temu, gdy powierzchnia Ziemi się ochłodziła na tyle, aby utrzymać ciekłą wodę i umożliwić powstawanie złożonych molekuł. Wtedy jest dobry moment na uruchomienie stopera.

Niegdysiejsze stopery — używane do mierzenia czasu na zawodach sportowych — miały u góry przycisk. Naciskając przycisk, uruchamiałeś stoper i te dziwne patyczki zwane wskazówkami kręciły się dookoła, aż ponownie nacisnąłeś przycisk i wtedy stoper zatrzymywał pomiar czasu. Jeżeli w niedzielne wieczory oglądasz uświęcony tradycją publicystyczny program *60 Minut* stacji CBS, to wiesz, że oni nadal używają takiego muzealnego czasomierza, który rozpoczyna i kończy program. To chyba jedyny program telewizyjny, który jako rozbiegówkę stosuje coś innego niż muzyka — tylko tykanie stopera.

Włącz stoper 4 miliardy lat temu: 200 milionów lat później zobaczysz pierwsze dowody istnienia życia na Ziemi — cyjanobakterie, które pojawiły się 3,8 miliarda lat temu. To dobra prognoza dla owego ułamka gwiazd w ekosferze, które krążą wokół długo żyjących gwiazd, ponieważ nasza planeta potrzebowała bardzo niewielkiego ułamka swojego całkowitego czasu, aby stworzyć pierwsze żywe istoty. Nadal nie wiemy, jak ten proces przebiegał — to wciąż jest ważny temat badań w biologii — ale zapewniam cię, że pracują nad tym najtęższe głowy. Wiemy, że zajęło to tylko około 200 milionów lat z 4 miliardów, które były do dyspozycji. Gdyby stworzenie życia było dla natury trudne i trwało długo, może pojawiłoby się na Ziemi po miliardzie lub po kilku miliardach lat. Ale skoro stało się to po zaledwie kilkuset milionach lat, to możemy zakładać, że ułamek f_L w równaniu Drake'a ma dużą wartość, być może nawet bliską 1.

Ograniczamy się oczywiście do takiego życia, jakie znamy. W pewnych kręgach to ograniczenie jest znane pod akronimem LAWKI[13]. Po prostu nie wiemy, nie mamy i nie możemy mieć pewności, czy inny sposób myślenia jest możliwy. Moglibyśmy zakładać istnienie życia, jakiego nie znamy, ale to zajęłoby całe tomy. Może mają siedem nóg, troje oczu, dwie twarze i są zbudowani z plutonu. Może gdzieś istnieje życie, jakiego nie znamy, ale nie wiemy, jak zadać właściwe pytania. To nie jest kwestia filozoficzna, lecz praktyczne zagadnienie: mamy przykład istnienia życia takiego, jakie znamy — to my sami. To tylko jeden przykład, ale wystarczający jako dowód istnienia. Próbujesz udowodnić, że coś istnieje, i masz jeden przykład tego czegoś w postaci selfie w swoim telefonie. To jest dowód, więc zacznijmy od tego, co mamy, i idźmy dalej. Wiemy także, że jesteśmy zbudowani z atomów, które są rozpowszechnione w całym Wszechświecie.

W jednym z odcinków pierwszej serii *Star Treka* załoga „Enterprise" napotkała formę życia zbudowaną z krzemu, a nie z węgla. My jesteśmy z węgla, ale krzem także jest rozpowszechniony w całym Wszechświecie. W tamtym odcinku *Star Treka* owa krzemowa istota wyglądała jak mały stosik kamieni, który chodzi jak kaczka. To był twórczy krok w przyszłość ze strony twórców *Star Treka*. Próbowali w ten sposób poszerzyć paradygmat możliwych form życia, które załoga „Enterprise" może napotkać w Galaktyce. Okazuje się, że krzem jest tuż pod węglem w układzie okresowym. Zapewne pamiętasz z chemii, że pierwiastki, które leżą w tej samej kolumnie układu okresowego, mają podobną strukturę zewnętrznych orbitali elektronowych. A jeżeli mają podobne struktury zewnętrznych orbitali, to tworzą podobne związki chemiczne z innymi pierwiastkami. Skoro wiemy już, że istnieją węglowe formy życia, dlaczego nie mielibyśmy zapytać, czy istnieją także formy krzemowe? Pytanie oczywiście jest zasadne, aczkolwiek we Wszechświecie jest około dziesięciu razy więcej węgla niż krzemu. Co więcej, molekuły krzemu mają tendencję do tworzenia mocnych wiązań chemicznych, co nie czyni z nich skutecznych graczy w eksperymentalnej chemii, jaką jest życie. Dwutlenek węgla jest gazem, natomiast dwutlenek krzemu jest ciałem stałym (piaskiem). W przestrzeni kosmicznej odkryliśmy złożone molekuły z długimi łańcuchami węgla, takie jak H–C≡C–C≡C–C≡C–C≡N (z

naprzemiennymi pojedynczymi i potrójnymi wiązaniami). Mamy aceton $(CH_3)_2CO$, benzen C_6H_6, kwas octowy CH_3COOH i wiele innych węglowych molekuł, które samoistnie powstały w obłokach międzygwiezdnego gazu. Odkryliśmy alkohol w gazach emitowanych przez kometę Lovejoy. Krzem nie tworzy tak złożonych molekuł, więc chemia krzemu jest znacznie mniej interesująca od chemii węgla. Jeżeli chcesz wybrać dla życia jakiś konkretny rodzaj chemii, to nie ma wątpliwości, że to będzie węgiel. Ze względu na rozpowszechnienie węgla w kosmosie i na właściwości jego wiązań chemicznych można z dużą dozą pewności założyć, że wszystkie formy życia, które zamieszkują Galaktykę, mają podobną chemię, nawet jeżeli nie są do nas podobne.

Ziemia jest naszym jedynym przykładem życia, które powstało w układzie słonecznym, więc możemy ostrożnie szacować wartość $f_L \sim 0{,}5$. W połowie między 0 i 1, nic pewnego, równe szanse, 50-50. Co dalej? Ułamek planet krążących w ekosferze wokół długo żyjących gwiazd, na których istnieje życie oraz istnieje też inteligencja. To już nie wygląda dobrze.

Niezależnie od metody, jaką wybierzemy do mierzenia inteligencji na Ziemi, ludzie na ogół znajdują się u samej góry. Wydaje się, że duży mózg jest istotny. Mamy duży mózg, ale słonie i wieloryby mają większy, więc może nie tylko rozmiary się liczą. Może chodzi o proporcje. Może stosunek masy mózgu do masy całego ciała decyduje o inteligencji. Człowiek ma największy w królestwie zwierząt stosunek masy mózgu do masy ciała. To my definiujemy kryteria, więc możemy sami siebie umieścić na samej górze, ale może to nasza pycha nie pozwala nam pomyśleć o tym w jakiś inny sposób. Umówmy się zatem, że jesteśmy inteligentni i — dla przykładu — zdefiniujmy inteligencję jako uprawianie algebry. Jeżeli inteligencja (którą naszym zdaniem mamy) jest zdefiniowana w taki sposób, to jesteśmy jedynym inteligentnym gatunkiem na Ziemi. Morświny nie uprawiają algebry pod wodą. Niezależnie od tego, jak złożone i przemyślane wydają się nam ich działania, one nie uprawiają algebry. Oprócz nas żaden inny gatunek w historii świata nie uprawiał algebry, więc jesteśmy inteligentni. Na potrzeby dalszego rozumowania przyjmijmy taką definicję. Przypuśćmy, że chcemy nawiązać konwersację z jakąś napotkaną formą życia. Nie użyjemy języka angielskiego. Musimy posłużyć się jakimś językiem, który jest bardziej rozpowszechniony w kosmosie — to będzie język nauki, język matematyki.

Jeżeli inteligencja jest istotnym czynnikiem przetrwania, to czy nie powinna częściej pojawiać się w danych wykopaliskowych? A nie pojawia się. To, że mamy inteligencję, nie oznacza, że okaże się ona niezbędna do przetrwania. Po następnej globalnej katastrofie karaluchy zapewne nadal tu będą, podobnie jak szczury, ale my wyginiemy. Nasz mózg nie na wiele się wtedy przyda.

Ale może nasza inteligencja da nam szansę uniknięcia przeznaczenia, podobnie jak mogła odwrócić los dinozaurów. Była taka kreskówka w „New Yorkerze", autorstwa Franka Cothama, w której wałęsają się dwa niezdarne dinozaury i jeden mówi do drugiego: „Mówię tylko, że teraz jest pora na to, aby rozwijać technologię odchylania trajektorii asteroidów". W międzyczasie, jak wiemy, asteroida zmierza w ich stronę, aby je unicestwić na zawsze. Może powinniśmy użyć swojej inteligencji, aby przedłużyć naturalny, statystyczny

czas życia naszego gatunku. Wyruszyć w przestrzeń i walczyć z asteroidami, które zmierzają ku nam — jeżeli jesteśmy skłonni przeznaczyć trochę pieniędzy dla NASA, aby zrobiła to dla nas. Ale to nie jedyne zagrożenie. Zobaczmy, co się stało z wiązami w Ameryce. Większość wiązów w Nowej Anglii zniszczył grzyb przenoszony przez korniki. Wyobraźmy sobie, że coś takiego atakuje ludzi. Jakiś nowy, zjadliwy wirus może wystarczyć, aby posłać nas wszystkich tam, gdzie grzyb posłał wiązy.

Inteligencja nie jest gwarancją przetrwania, natomiast wzrok wydaje się niezwykle istotny. Dzięki doborowi naturalnemu u wielu różnych gatunków zwierząt wyewoluowały narządy wzroku. Struktura ludzkiego oka nie ma nic wspólnego ze strukturą oka muchy, która nie ma nic wspólnego ze strukturą oka małża przegrzebka. Wydaje się wprawdzie, że istnieje jeden pierwotny gen kodujący budowę oka, ale różne rodzaje oka powstały wzdłuż różnych ewolucyjnych ścieżek. Wzrok musi być bardzo ważny do przetrwania. A co z lokomocją, z umiejętnością poruszania się? Klony nie mają nóg, ale ich nasiona mają skrzydełka, dzięki którym wiatr może je ponieść daleko i rozrzucić szeroko. Lokomocja wydaje się istotna, ponieważ obserwujemy wiele różnych sposobów przemieszczania się: węże pełzają, homary kroczą, meduzy stosują napęd odrzutowy, bakterie wykorzystują wici. Wiele owadów i większość ptaków fruwa. Ludzie chodzą, biegają, pływają, jeżdżą autami, pociągami, pływają statkami, latają samolotami i rakietami. Podobnie jak inne gatunki umiemy się przemieszczać, lecz nadal jesteśmy jedynym gatunkiem żyjącym na Ziemi, który zajmuje się algebrą. To nie wzbudza we mnie przekonania, że inteligencja jest nieuniknioną konsekwencją drzewa życia. Podobny pogląd wygłosił biolog ewolucyjny, Stephen Jay Gould. Wszystko to sugeruje, że ułamek f_i może się okazać dość niewielki. Załóżmy $f_i < 0{,}1$, biorąc pod uwagę fakt, że może się okazać jeszcze mniejszy. Moja opinia w tej kwestii różni się od opinii niektórych moich kolegów, którzy pracują w Instytucie SETI. Oni woleliby, aby ten ułamek miał dużą wartość, bo w przeciwnym razie nie bardzo wiadomo, czego mieliby szukać. Wiedzą, że nie będą rozmawiać z bakteriami.

Gdy na twojej planecie wyewoluuje inteligencja, rozwój technologii prawdopodobnie jest nieunikniony. Mógłbym nawet założyć, że $f_c \sim 1$. Znasz algebrę, masz dociekliwy umysł, chcesz ułatwić sobie życie, chcesz mieć wakacje, chcesz oglądać HBO i tak dalej; z takimi motywacjami ułamek inteligentnych istot, które rozwijają technologię, może być dość wysoki. Przecież jedyny gatunek, o którym wiemy, że umie algebrę, nie poprzestał na samej algebrze, lecz stworzył technologię umożliwiającą komunikację na międzygwiezdne odległości. Jeżeli jednak technologia zawiera zalążki autodestrukcji (gdy wynajduje coraz lepsze metody zabijania przedstawicieli własnego gatunku i gdy stanowi coraz większe zagrożenie dla całej planety), to bardzo mi przykro, ale może się okazać, że czas istnienia naszej technologicznej, komunikatywnej kultury stanowi niewielki ułamek wieku Galaktyki. W ostatnim rozdziale Rich przeprowadzi rozumowanie oparte na zasadzie kopernikańskiej (mówi ona, że nasze położenie wśród pozaziemskich cywilizacji, które opanowały technologię komunikacji radiowej, nie jest w

żaden sposób uprzywilejowane), z którego wynika, że średni czas istnienia komunikatywnych cywilizacji jest raczej krótszy od 12 tysięcy lat. Jeśli podzielimy ten czas przez wiek Galaktyki, to ułamek faktycznie jest niewielki.

Chodzi o to, żeby do wzoru Drake'a wstawić najlepsze możliwe wartości liczbowe, aby w końcu oszacować liczbę komunikatywnych cywilizacji. Na temat poszczególnych elementów i czynników tego wzoru napisano całe podręczniki. W ten sposób staramy się zorganizować nasze rozważania na temat poszukiwania życia.

Równanie Drake'a miało gościnny występ w 1997 roku w filmie *Kontakt*, którego scenariusz był oparty na książce Carla Sagana i jego żony, Ann Druyan (niedawno prowadziłem nową wersję serialu *Cosmos*, wspólnie z Ann i z jej kolegą, Stevenem Soterem, współautorami, wraz z Saganem, oryginalnego serialu nadawanego w latach osiemdziesiątych). Twórcy filmu byli na tyle sprytni, że nie pokazali Obcych, ponieważ musieliby zdecydować, jak oni wyglądają. Jak powinni wyglądać? Nie wiemy. W filmach kategorii B z lat pięćdziesiątych zawsze występował aktor w przebraniu grający rolę Obcego. Wszyscy Obcy z innych planet zawsze mieli głowę, dwie ręce i chodzili na dwóch nogach. W 1982 roku w filmie *E.T.* Obcy jest uroczym stworzeniem o śmiesznym wyglądzie, ale nadal ma dwoje oczu, dwoje nozdrzy, zęby, ręce, szyję, nogi, kolana, stopy i palce. W porównaniu z meduzą E.T. wygląda niemal jak człowiek. To brak wyobraźni po stronie Hollywood. Jak już napisałem powyżej, jeżeli masz zamiar wymyślać nowe formy życia, to powinny się bardziej różnić od wszystkiego, co żyje na Ziemi, niż jakiekolwiek dwie istoty żyjące na Ziemi różnią się między sobą. Nawet w kosmicznym thrillerze *Obcy* z 1979 roku tytułowy bohater wykazał się wprawdzie pewną inwencją w odróżnianiu się od Ziemian, ale nadal miał głowę i zęby.

Wróćmy do filmu *Kontakt*. Po raz pierwszy w życiu uczestniczyłem w światowej premierze filmu. Zaproszenie zawdzięczałem Carlowi Saganowi i Ann Druyan, którzy zaprosili mnie osobiście. Nie bywam w Hollywood, więc miałem dwa dość kłopotliwe momenty w trakcie tej premiery. Idziesz po tym czerwonym dywanie w szpalerze fotografów, a gdy już wejdziesz do wewnątrz, widzisz na ścianach plakaty filmowe i przechodzisz koło baru, na którym stoi popcorn i woda mineralna. Więc sięgam po kubek popcornu, pytam gościa, który stoi za barem: „ile?", a on na to: „pięćdziesiąt dolarów". Na moment zaparło mi dech. Przez chwilę przyglądał mi się z uciechą, po czym zadeklarował: „oczywiście jest za darmo". A ja po pięciu sekundach racjonalnej analizy powiedziałem sam do siebie, oczywiście, że jest za darmo, musi być za darmo. Przecież światowa premiera filmu nie jest po to, żeby sprzedawać popcorn. Poprosiłem o wybaczenie, tłumacząc, że jestem bezradnym gościem ze Wschodniego Wybrzeża. Po premierze było przyjęcie. Na każdym stoliku był mały teleskop albo jakiś inny astronomiczny przyrząd. Pomyślałem, że to pomysł z klasą, po czym zacząłem się zastanawiać, skąd wzięli tyle tych gadżetów; zapewne jakaś amatorska organizacja miłośników astronomii wypożyczyła im te teleskopy. Chciałem koniecznie to sprawdzić, ponieważ byłaby to bardzo aktywna organizacja, skoro posiadała tyle sprzętu. Poszedłem do organizatora tej imprezy i zapytałem: „Skąd wzięliście te

teleskopy?". Popatrzył na mnie w taki sposób, że pierwsza część odpowiedzi z pewnością brzmiałaby: „Ty idioto", gdyby ją wypowiedział, po czym rzekł (tym razem na głos): „dostaliśmy je z magazynu rekwizytów". Drugie głupie pytanie gościa ze Wschodniego Wybrzeża. Okej, najwyraźniej magazyny rekwizytów mają wszystko, łącznie z teleskopami.

W filmie jest scena, gdy Jodie Foster, grająca główną bohaterkę, oraz partnerujący jej Matthew McConaughey, obserwują gwiazdy. Ona pokazuje mu gwiazdy i planety, kamera najeżdża trochę bliżej i w pewnym momencie ona zaczyna cytować skróconą wersję równania Drake'a. Zaczyna od 400 miliardów gwiazd w Drodze Mlecznej. Może być. Ja napisałem, że jest 300 miliardów, ale to jest mało istotne, w ramach tych poszukiwań to mieści się w marginesie błędu. Ona mówi dalej — zwracam uwagę, że ona jest naukowcem, który poszukuje inteligentnego życia we Wszechświecie — „tam jest 400 miliardów gwiazd, tylko w naszej Galaktyce; jeżeli tylko jedna na milion ma planety, jeżeli jedna na milion tych planet ma życie, jeżeli jedna na milion z nich ma inteligentne życie, to tam będą miliony cywilizacji".

Biorąc „jedną na milion", za pierwszym razem Jodie ścina 400 miliardów do 400 tysięcy. Za drugim razem? Ponownie ścina, tym razem z 400 tysięcy do 0,4. Trzeci raz? Sorry, Jodie, zostajesz z 0,0000004 cywilizacji w Galaktyce, a nie z milionami. To była światowa premiera, więc zgadnij, kto siedzi niedaleko mnie w poprzednim rzędzie — sam Frank Drake. Ja dostaję apopleksji, a on wydaje się kompletnie niewzruszony tym arytmetycznym błędem. Może bardziej wzruszył go romans. Zaraz po tym, jak Jodie wypowiada tę kwestię, ona i McConaughey zaczynają się całować i w następnej scenie lądują w łóżku. Nie da się zaprzeczyć, że wtrącanie równania Drake'a w takim momencie rzeczywiście nadaje filmowi charakter *geek romance*. Ale różnica między moją reakcją i reakcją Franka Drake'a dała mi do myślenia. Może czasami przesadnie reaguję na takie rzeczy.

Okazuje się, że Jodie Foster została poinformowana o tym błędzie, lecz o wiele za późno, aby coś się dało z tym zrobić. Była tym wzburzona, ponieważ uważnie przestudiowała tę kwestię i pracowała nad swoją wypowiedzią, żeby właściwie oddać zarówno jej rytm, jak i nastrój romansu. Zatem kto jest winien? Okazało się, że Jodie Foster poprawnie powiedziała to, co było w scenariuszu. Czy mamy oskarżyć autora scenariusza? Może. Asystenta reżysera? Ewentualnie. Carla Sagana, który nie żył już od roku? Oczywiście nie. Ktoś popełnił błąd[14].

Uważam, że to doskonały film. Inteligentnie rozegrano kwestię granicy między nauką i religią (postać grana przez McConaugheya jest filozofem religii), ze świadomością, że różni ludzie mogą mieć bardzo zróżnicowane poglądy w tych kwestiach. Trafnie pokazano całą gamę reakcji, jakiej można się spodziewać w popkulturze na wiadomość o odkryciu obcej, pozaziemskiej inteligencji, łącznie z reakcją głupców. Głupcy reagują nawet wtedy, gdy niczego nie odkrywamy. Mam całe pudełka listów od ludzi, którzy przysyłają mi swoje najnowsze teorie na temat Wszechświata. Mam kartkę od kogoś, kto pisze: „gdy gapię się na Księżyc w nocy, moje piwo smakuje lepiej niż powinno. Co mam zrobić?".

Podsumowując, trochę dla zabawy i ze świadomością, że te liczby nie są całkiem pewne, wstawimy teraz do wzoru Drake'a rezultaty naszych rozważań i obliczymy wynik:

$$N_c = N_s \times f_{HP} \times f_L \times f_i \times f_c \times (L_c/L_G).$$

N_c = 300 miliardów × (0,006) × (0,5) × (<0,1) × 1 × (<12 000 lat / 10 miliardów lat).

$$N_c < 108.$$

Zgodnie z naszymi oszacowaniami dla wszystkich czynników w tym wzorze możemy się spodziewać, że znajdziemy w Galaktyce nie więcej niż sto cywilizacji, które teraz komunikują się za pomocą radia. Nasze największe radioteleskopy potrafią wykryć swoje odpowiedniki — swoich pozaziemskich pobratymców — we wszystkich zakątkach Galaktyki. A więc mamy szansę. Dopiero zaczęliśmy szukać.

Oprócz naszej Drogi Mlecznej w zasięgu 2,5 miliarda lat świetlnych od nas istnieje około 50 milionów innych galaktyk podobnych do naszej. Pomnożywszy nasze *N*c przez owe 50 milionów, dostajemy nie więcej niż 5 miliardów pozagalaktycznych cywilizacji, które komunikują się za pomocą radia. Wszystkie te galaktyki mają miliardy lat w epoce, w której je obserwujemy — mnóstwo czasu, aby inteligentne życie mogło się tam rozwinąć, jeżeli w ogóle miało taki zamiar. Najbardziej odległe spośród tych pozagalaktycznych cywilizacji (2,5 miliarda lat świetlnych od nas) byłyby mniej więcej 40 tysięcy razy dalej niż najbardziej odległe wśród tych, które możemy znaleźć w naszej własnej Galaktyce (62 500 lat świetlnych od nas). Prawo odwrotnych kwadratów mówi, że przeciętna pozagalaktyczna cywilizacja miałaby radiową jasność równą tylko 1/1 600 000 000 radiowej jasności przeciętnej cywilizacji z naszej własnej Galaktyki. Dlatego zwykle ograniczamy się do poszukiwań pozaziemskich cywilizacji tylko w naszej Galaktyce.

Polowanie na pozagalaktyczne cywilizacje nie jest jednak tak beznadziejnym przedsięwzięciem, jak mogłoby się na pierwszy rzut oka wydawać. Inteligentne cywilizacje mogą wysyłać sygnały na wszystkie strony, albo tę samą ilość energii wysłać w postaci zogniskowanej, bardziej intensywnej wiązki skierowanej w mały obszar nieba. Cywilizacja może dziesięciokrotnie zwiększyć swoją jasność, jeżeli całą energię skieruje w 1/10 część nieba. Cywilizacja może zwiększyć swoją jasność 50 milionów razy, jeżeli całą energię skieruje w 1/50-milionową część nieba. Większość obserwatorów nie zarejestruje tego sygnału, lecz dla tych kilku, którzy znajdą się w tej wiązce, sygnał będzie widoczny z bardzo dużej odległości. Sam Frank Drake zastosował tę strategię, gdy w 1974 roku zaprojektował i zrealizował operację, w ramach której 1000-stopowy radioteleskop Arecibo wysłał wąską wiązkę sygnałów radiowych w kierunku gromady kulistej M13 (okazało się, że nie wysłali sygnału w to miejsce, w którym M13 będzie się znajdować, gdy sygnał tam dotrze. Ruch gromady wzdłuż orbity wokół Drogi Mlecznej

spowoduje, że gdy sygnał dotrze na miejsce, gromada będzie już poza wiązką. Sygnał w ogóle nie trafi w gromadę, ale ten szczegół nie jest tu istotny). Jeżeli różne cywilizacje wybiorą różne strategie i różne rodzaje wiązek — niektóre będą świecić we wszystkich kierunkach, a inne w wąskich wiązkach — to rozkład obserwowanej jasności różnych źródeł będzie bardzo szeroki. Taki rozkład spełnia tak zwane prawo Zipfa, które mówi, że sygnał o największej obserwowanej jasności przewyższa sygnał o *N*-tej kolejnej jasności o czynnik w przybliżeniu równy *N*. Przy 50 milionach galaktyk oznacza to, że cywilizacja o największej obserwowanej jasności będzie się wydawać około 50 milionów razy jaśniejsza od obserwowanej jasności radionadajnika znajdującego się w naszej Galaktyce. Mając 50 milionów razy więcej szans, możemy mieć szczęście i trafić w czyjąś bardzo jasną i wąską wiązkę. Czyli najjaśniejsza pozagalaktyczna cywilizacja może mieć obserwowaną jasność równą 1/32 (= 50 000 000 / 1 600 000 000) najjaśniejszej cywilizacji, którą obserwujemy w naszej Galaktyce. Biorąc pod uwagę to rozumowanie, powinniśmy także przedsięwziąć poszukiwania pozagalaktycznych cywilizacji.

Na koniec nieco zastrzeżeń w odniesieniu do równania Drake'a. Ekosfera może być jeszcze węższa, niż nam się wydaje. Gdyby Ziemia była dalej od Słońca, byłaby zimniejsza i miałaby większe pokrywy lodu na biegunach; wzrósłby współczynnik odbicia powierzchni Ziemi, zmniejszając absorpcję strumienia słonecznego. Ziemia ochłodziłaby się jeszcze bardziej i wpadłaby w epokę lodową. Gdyby Ziemia znalazła się bliżej Słońca, lód by stopniał, zmniejszyłby się współczynnik odbicia i Ziemia zaczęłaby się coraz bardziej rozgrzewać. Uwięziony w torfie metan ulotniłby się do atmosfery, wzmacniając efekt cieplarniany.

W trakcie swej trwającej miliardy lat ewolucji Słońce staje się coraz bardziej gorące. Aby to skompensować i utrzymać zakres temperatury, w którym cywilizacja może się rozwijać, efekt cieplarniany musi osłabnąć lub współczynnik odbicia musi wzrosnąć. Jeżeli moc gwiazdy ewoluuje w okresie kilku miliardów lat, ekosfera będzie się stopniowo oddalać, a planeta musi pozostać w ekosferze dostatecznie długo, aby inteligentne życie mogło się rozwinąć. Jak wspomnieliśmy powyżej, wydaje się, że planeta musi być zamieszkiwalna przez miliardy lat, aby życie miało dość czasu na ewolucję inteligencji.

Wydaje się, że samo życie może także naruszyć równowagę. Jeżeli gwiazda typu M na ciągu głównym nie ewoluuje znacząco przez 10 miliardów lat, to planeta może początkowo nadawać się na siedlisko dla prostych organizmów, ale gdy zamienią one atmosferę bogatą w dwutlenek węgla w atmosferę bogatą w tlen, efekt cieplarniany osłabnie i planeta wpadnie w permanentną epokę lodową. To jest kolejny powód, dla którego gwiazdy typu M mogą nie być idealnym miejscem dla ewolucji inteligentnego życia.

Życie może wpływać na ekosferę na wiele różnych sposobów. Dwutlenek węgla może być wychwytywany z atmosfery, przetwarzany w węglan wapnia jako budulec muszli dla morskich zwierząt, a następnie deponowany w postaci skał osadowych (wapieni), gdy owe zwierzęta giną i osiadają na dnie oceanu. Zmniejszenie ilości dwutlenku węgla w atmosferze osłabia efekt cieplarniany.

Aktywność wulkanów powoduje pompowanie dwutlenku węgla do atmosfery, co wzmacnia efekt cieplarniany. I oczywiście takie formy życia jak człowiek mogą wydobywać paliwa kopalne, ropę i węgiel, powstałe w poprzednich epokach z dawnych organizmów i ukryte pod ziemią. Spalanie tych substancji powoduje pompowanie kolejnych porcji dwutlenku węgla do atmosfery z wiadomym skutkiem. Oszacowania ekosfery dla konkretnej planety muszą zatem ściśle zależeć od jej geologii, meteorologii, a nawet od jej biologii.

---

1 Liniowa zależność stałego promienia od temperatury wymaga nieco głębszej analizy, którą autorzy pominęli.

2 Zwykle oś pionowa na diagramie energii wiązania na nukleon jest opisana energią rosnącą w górę. Tu jest na odwrót.

3 Mgławica Oriona leży w odległości około 1300 lat świetlnych od nas, więc zachodzące w niej procesy oglądamy z opóźnieniem 1300 lat.

4 Carl Sagan, *Błękitna kropka. Człowiek i jego przyszłość w kosmosie*, przeł. M. Krośniak, Zysk i S-ka Wydawnictwo, Poznań 2018, s. 31.

5 Mechanizm spłaszczania wirujących galaktyk, czyli obiektów niespójnych, jest nieco inny niż mechanizm spłaszczający gwiazdy i planety.

6 To raczej gęstość jest funkcją (skutkiem) ciśnienia i temperatury.

7 W rezultacie to nie foton się przebija, lecz energia, tak jak jest napisane powyżej.

8 Aluzja do określenia *supergiant* — nadolbrzym.

9 Kometa Hale-Boppa o średnicy 35 kilometrów została odkryta zaledwie dwa lata przed jej maksymalnym zbliżeniem do Słońca. Gdyby trafiła w Ziemię, spowodowałaby wybuch o sile 4 miliardów megaton TNT, ponad 60 milionów razy większej niż najpotężniejsza kiedykolwiek zdetonowana bomba wodorowa.

10 Wielka Czerwona Plama została po raz pierwszy zaobserwowana w 1650 roku. Wcześniejsze obserwacje nie są znane, wobec czego nie wiemy, kiedy powstała.

11 „Moja Bardzo Wykształcona Matka Właśnie Zaserwowała Nam Dziewięć Pizz". W języku polskim funkcjonują m.in. takie mnemoniki: dla dziewięciu planet „Moją Wolę Znaj Matole, Jak Się Uprę, Nie Pozwolę"; dla ośmiu planet „Moja Wiecznie Zapracowana Mama Jutro Sama Usmaży Naleśniki".

12 W 2018 roku przesunięto start na rok 2021.

13 „Life As We Know It" — Życie takie, jakie znamy.

14 Może istnieje karta wychodzisz-wolny-z-więzienia dla autora scenariusza. Na początku Jodie mówi, że tylko w naszej Galaktyce istnieje 400 miliardów gwiazd, a na końcu mówi, że istnieją „tam" miliony cywilizacji. Czy miała na myśli „tam" w Galaktyce, jak można było przypuszczać, czy „tam" we Wszechświecie? Spróbujmy tej drugiej wersji. Istnieje 130 miliardów galaktyk w widocznym Wszechświecie (Jodie wypatruje istot pozaziemskich, więc widoczny Wszechświat to jest najdalej, jak się da spojrzeć). W tym przypadku trzeba pomnożyć 0,0000004 przez 130 miliardów, co daje 52 tysiące cywilizacji w widocznym Wszechświecie. Więc nawet to nie zadziała.

Część II – Galaktyki

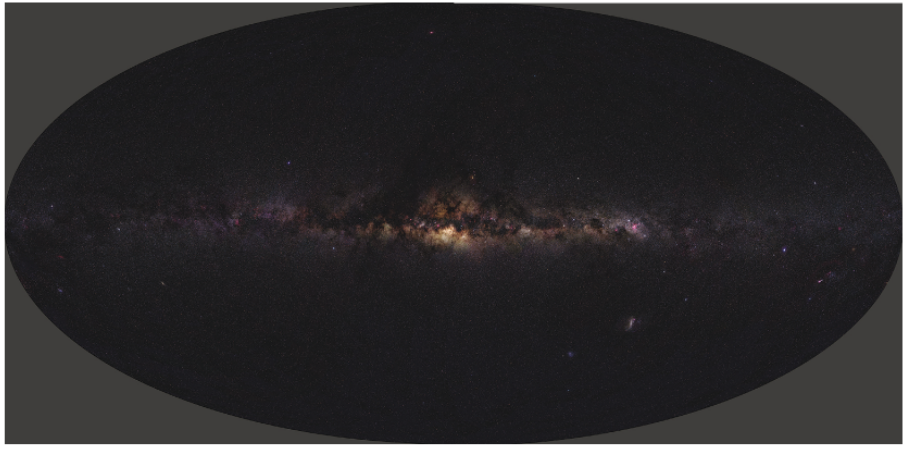
11 – Ośrodek międzygwiezdny

Michael A. Strauss

Przejdziemy teraz od studiowania pojedynczych gwiazd i planet do szerszego spojrzenia na rozkład gwiazd w naszej galaktyce, Drodze Mlecznej, na ich oddziaływania oraz na ośrodek międzygwiezdny. Do tej pory traktowaliśmy przestrzeń między gwiazdami tak, jakby w zasadzie była pusta, lecz w tym rozdziale mam zamiar cię przekonać, że w rzeczywistości ta ogromna objętość przestrzeni między gwiazdami zawiera duże ilości materiału — ma wprawdzie małą gęstość, ale jest rozłożona w olbrzymiej objętości. „Międzygwiezdna" oznacza oczywiście „między gwiazdami", a „ośrodek" (ang. medium) to „rzecz", materia, więc ośrodek międzygwiezdny to „rzeczy między gwiazdami".

Popatrzmy zatem na ośrodek międzygwiezdny, któremu zawdzięczamy wiele pięknych obrazów w astronomii.

Ilustracja 11.1 to składanka wielu różnych obrazów Drogi Mlecznej. Przedstawia pełną sferę nieba, sprytnie zrzutowaną na płaską płaszczyznę. Pasmo światła, które czasem widzimy rozpięte w kształcie łuku na nocnym niebie, a nazywamy Drogą Mleczną, w rzeczywistości rozciąga się w pełnym okręgu wokół sfery niebieskiej, wyznaczając geometrycznie tak zwany równik galaktyczny. Nasza Droga Mleczna ma kształt dysku, a my znajdujemy się wewnątrz tego dysku, więc gdy na niego patrzymy, widzimy pasmo światła okrążające niebo. Najjaśniejsza część Drogi Mlecznej (w kierunku centrum Galaktyki, w środku tej panoramy) nie jest dobrze widoczna ze średnich szerokości geograficznych na półkuli północnej. Jeżeli kiedyś znajdziesz się na półkuli południowej w czasie bezchmurnej, bezksiężycowej nocy, daleko od miejskich świateł, spójrz w górę! Zwłaszcza od marca do lipca widok Drogi Mlecznej z półkuli południowej robi niesamowite wrażenie. Widziana stamtąd Droga Mleczna jest znacznie jaśniejsza niż to, co mogą zobaczyć ci z nas, którzy mieszkają na północy.



ILUSTRACJA 11.1. Panorama całego nieba przedstawiająca Drogę Mleczną. Odległe gwiazdy Drogi Mlecznej tworzą pasmo światła okrążające niebo wzdłuż równika galaktycznego, zrzutowane na prostą, poziomą linię biegnącą przez środek mapy. Centrum Drogi Mlecznej jest w środku. Zwróć uwagę na ciemne linie i ciemne plamy wzdłuż Drogi Mlecznej w tych obszarach, gdzie gwiazdy są zasłonięte przez pył

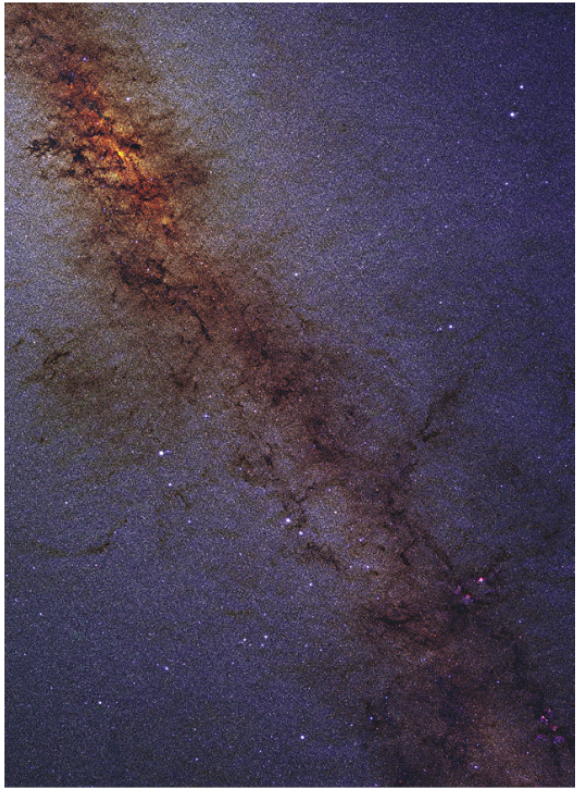
Photo credit: J. Richard Gott, Robert J. Vanderbei, *Sizing Up the Universe*, „National Geographic", 2011. Oparte na danych z Main Sequence Software.

Słońce i Ziemia znajdują się w połowie drogi od środka dysku, więc widok robi wrażenie, jakbyśmy patrzyli na Drogę Mleczną z boku. Jedną z rzeczy, które od razu rzucają się w oczy jest fakt, że Droga Mleczna nie jest gładka. Wygląda, jakby miała czarne krosty i łaty. Jeżeli spojrzysz na nią przez teleskop, przekonasz się (jak wiadomo, po raz pierwszy przekonał się Galileusz), że rozproszone światło Drogi Mlecznej w rzeczywistości stanowi połączone światło miriad gwiazd, lecz są także obszary (ciemne linie), gdzie nie widać żadnych gwiazd. Sto lat temu astronomowie spierali się, co może być przyczyną tych linii. Jedna z możliwości, jakie rozważali, polegała na tym, że rozkład gwiazd jest z natury niejednorodny, więc ciemne obszary to po prostu miejsca, gdzie jest niewiele gwiazd. Alternatywna hipoteza (jak się okazało, poprawna) polega na tym, że rozkład gwiazd jest jednorodny, lecz coś je zasłania. To coś to ośrodek międzygwiezdny.

Jednym z przejawów lub dowodów na istnienie ośrodka międzygwiezdnego jest fakt, że jest nieprzezroczysty. Jest bardzo rozrzedzony, lecz zajmuje duże obszary przestrzeni. W atmosferze Ziemi nawet drobna mgiełka lub niewielka ilość dymu potrafi przesłonić widok odległych obiektów. Ośrodek międzygwiezdny składa się z maleńkich cząstek pyłu, podobnych do cząstek dymu. Astronomowie używają technicznego określenia „pył", chociaż „dym" byłby chyba lepszym terminem. Ośrodek międzygwiezdny jest bardzo rozrzedzony, lecz na bardzo dużych odległościach efekty jego oddziaływania kumulują się i w rezultacie może zaabsorbować światło gwiazd tła. W niektórych kierunkach kumulatywny efekt pyłu jest tak silny, że całkowicie zasłania światło gwiazd. Dla przykładu, samo centrum Drogi Mlecznej jest całkowicie zasłonięte dla światła widzialnego.

Okazuje się, że pył bardziej zasłania światło o krótszych długościach fali. Absorpcja podczerwonych długości fali jest znacznie słabsza niż absorpcja światła widzialnego. Przy obserwacji w zakresie podczerwonym można w zasadzie zobaczyć całą Drogę Mleczną. Ilustracja 11.2 przedstawia

powiększone zdjęcie centrum naszej Galaktyki wykonane w czasie Dwumikronowego Przeglądu Całego Nieba (Two Micron All-Sky Survey, w skrócie 2MASS, akronim jest całkiem adekwatny, ponieważ te obserwacje prowadzili astronomowie z University of Massachusetts). Jak sugeruje nazwa, 2MASS obserwuje promieniowanie podczerwone o długości fali około 2 mikronów (2×10^{-6} metra), znacznie większej od długości fali światła widzialnego (0,4-0,7 mikrona). Widać, że światło na zdjęciu pochodzi od pojedynczych gwiazd. Efekty wynikające z pochłaniania przez pył są nadal widoczne, lecz nie w tak ekstremalnym stopniu jak w przypadku światła widzialnego. Preferencyjne osłabienie światła niebieskiego powoduje, że obiekt wygląda, jakby był czerwony. Gdy patrzymy na gwiazdy przez pył, wydają się „poczerwienione" w stosunku do swego normalnego koloru. Ten mały, najjaśniejszy, czerwonawy punkt wyłaniający się spod pyłu w lewym górnym rogu to jest samo centrum Galaktyki, gęsta grupa gwiazd, wśród których ukrywa się czarna dziura o masie 4 milionów mas Słońca.



ILUSTRACJA 11.2. Centrum Drogi Mlecznej. Pył obecny w Galaktyce bardziej osłabia światło o mniejszych długościach fali, dając widocznym za nim gwiazdom charakterystyczny czerwonawy odcień. To zdjęcie obejmuje obszar o średnicy około 4 tysięcy lat świetlnych. Znajduje się w nim około 10 milionów gwiazd. Samo centrum Galaktyki jest widoczne jako jasny, czerwony punkt w lewym górnym rogu

Photo credit: atlas zdjęć wykonany w ramach Two Micron All-Sky Survey (Dwumikronowy Przegląd Całego Nieba), wspólny projekt University of Massachusetts oraz Infrared Processing and Analysis Center (Centrum Przetwarzania i Analizy Podczerwieni)/California Institute of Technology, sfinansowany przez NASA oraz NSF (National Science Foundation)

Widoczny na ilustracji 11.3 ciemny obszar to tak zwana gromada Worek Węgla. Jest to duży, widoczny gołym okiem obłok pyłu, całkowicie zasłaniający leżące za nim gwiazdy. Australijscy Aborygeni znali Worek Węgla od niemal 40 tysięcy lat. Gromada przypomina głowę emu, ciemny obszar Drogi Mlecznej dobrze znany w kulturze plemion aborygeńskich.

Ośrodek międzygwiezdny nie jest wcale jednorodny. Zawiera wiele gęstych obłoków i różnych obszarów o rozmaitych kształtach i rozmaitej gęstości. Oprócz pyłu zawiera także gaz złożony głównie z wodoru, tlenu i innych pierwiastków. Na te rozmyte, podobne do chmur obiekty widoczne na niebie (w odróżnieniu od punktowych świateł gwiazd) używamy określenia mgławice (ang. *nebulae*, od średniowiecznego angielskiego słowa *nebule* — chmura lub mgła; angielskie określenie *nebula* pochodzi z kolei od łacińskiego *nebula* — mgła). Te chmury gazu nie tylko zasłaniają nam widok gwiazd. Na ilustracji 11.4 widoczna jest Mgławica Oriona. Można ją dostrzec gołym okiem na końcu miecza Oriona zwisającego mu u pasa. Nawet przez zwykłą lornetkę nie przypomina gwiazdy, ponieważ jej obraz wydaje się rozmyty; wyraźnie różni się od punktowego obrazu gwiazdy. Fotony ultrafioletowego światła emitowane przez gorące gwiazdy są pochłaniane przez atomy gazu obecne w ośrodku międzygwiezdnym. Atomy zostają wzbudzone do wysokich poziomów energii. Gdy elektrony w tych atomach powracają na niższe poziomy, emitują fotony o określonych długościach fali, jak widzieliśmy w rozdziale 4. Te procesy powodują powstawanie rozmaitych kolorowych mgławic, które obserwujemy na niebie. Światło ulicznych neonów powstaje w taki sam sposób. Pierwiastek neon jest zresztą obecny w ośrodku międzygwiezdnym.



ILUSTRACJA 11.3. Gromada Worek Węgla. Obszar Drogi Mlecznej całkowicie zasłonięty przez gęsty obłok pyłu na pierwszym planie

Photo credit: Vic Winter, Jen Winter



ILUSTRACJA 11.4. Mgławica Oriona. Obszar formowania gwiazd. Jasne kolory pochodzą od fluorescencji gazu oświetlonego od wewnątrz przez młode, jasne gwiazdy. Widoczne są także włókna pyłu

Photo credit: NASA, ESA, T. Megeath (University of Toronto), M. Robberto (STScI)

Mgławica Oriona jest przykładem mgławicy emisyjnej, co oznacza, że jej widmo jest zdominowane przez linie emisyjne odpowiadające różnym przejściom elektronowym w atomach. Możemy identyfikować poszczególne pierwiastki w mgławicy dzięki znajomości długości fal obserwowanych linii emisyjnych. Czerwonawy kolor na zdjęciu pochodzi od przejścia elektronowego z poziomu $n = 3$ na poziom $n = 2$ w wodorze (Hα, jedna z linii w serii Balmera, opisanej w rozdziale 6). Ślady zielonego koloru pochodzą od przejść w atomach tlenu, a inne pierwiastki produkują inne kolory. Ciemne obszary to zgęszczenia pyłu zmieszanego z gazem.

Obiekt na ilustracji 11.5 to mgławica Trójlistna Koniczyna. Nazwa pochodzi od trzech linii pyłu, które dzielą mgławicę na trzy części. Linie pyłu blokują promieniowanie; gdyby ich nie było, widzielibyśmy gładki obraz całej mgławicy. Tak jak w poprzednich przypadkach gaz świeci pod wpływem gorących gwiazd znajdujących się wewnątrz mgławicy, a czerwony kolor pochodzi od linii Hα. Niebieski obszar po prawej stronie to światło niebieskich gwiazd odbite od cząstek pyłu, które działają jak lustro. Tę część nazywamy mgławicą refleksyjną. Niebieskie światło przechodzące przez obłok pyłu jest absorbowane, co powoduje, że gwiazda obserwowana na wprost przez obłok wydaje się czerwona. Ale to niebieskie światło musi znaleźć jakieś ujście — albo jest absorbowane, albo odbijane w innym kierunku. Dlatego mgławice refleksyjne zazwyczaj są niebieskie.



ILUSTRACJA 11.5. Mgławica Trójlistna Koniczyna. Czerwony kolor pochodzi z fluorescencji gazu — od linii Hα wodoru, natomiast niebieski kolor to głównie światło gwiazd odbite od wszechobecnego pyłu

Photo credit: Adam Block, Mt. Lemmon SkyCenter, University of Arizona

Plejady to młoda, widoczna gołym okiem gromada gwiazd. Zdjęcia wykonane dużym teleskopem (il. 7.2) pokazują, że gwiazdy podświetlają pył, dając w rezultacie niebieską mgławicę refleksyjną. Każda niebieska gwiazda jest otoczona przez rozmytą niebieską plamę.

Ośrodek międzygwiezdny to surowiec, z którego powstają gwiazdy, jak wspomnieliśmy w rozdziale 8. Ośrodek międzygwiezdny jest na ogół rozmyty w całej objętości Drogi Mlecznej, lecz w pewnych obszarach, takich jak mgławice emisyjne i ciemne obłoki, jest względnie gęsty — w tych obszarach są dobre warunki do powstawania nowych gwiazd. Grawitacja tworzy małą grudkę w obłoku pyłu i gazu. Gdy materia otaczająca grudkę zapada się w kierunku środka, rozgrzewa się, zamieniając energię grawitacyjną w energię kinetyczną. W pewnym momencie staje się na tyle gorąca i gęsta, że pojawiają się reakcje termojądrowe i rodzi się gwiazda. Rdzeń mgławicy Trójlistna Koniczyna jest pełen masywnych, gorących, niebieskich gwiazd. Takie gwiazdy żyją szybko i giną wcześnie, więc musiały powstać całkiem niedawno.

To wszystko odbywa się w ogromnej skali. W Mgławicy Oriona zaobserwowaliśmy około siedmiuset gwiazd w trakcie formowania. Wiele z nich otaczają dyski pyłu i gazu, z których mogą powstać planety. Tak jak w Mgławicy Oriona i w mgławicy Trójlistna Koniczyna gwiazdy zazwyczaj powstają w dużych grupach, a nie pojedynczo. Po pewnym czasie promieniowanie i wiatry słoneczne młodych gwiazd odparowują i zdmuchują otaczające je pyły, stopniowo odsłaniając same gwiazdy. Młode gwiazdy często emitują wiatry składające się z gorących gazów emitowanych z powierzchni, analogicznych — lecz silniejszych — jak wiatr słoneczny emitowany przez nasze Słońce. Te wiatry rzeźbią otaczające je gazy i pyły, nadając niektórym mgławicom taki widok, jakby były smagane wiatrem.

Nadal nie w pełni rozumiemy szczegóły formowania gwiazd — jest to jeden z najważniejszych, nierozwiązanych problemów astronomii. Nie wszystkie gęste obszary w ośrodku międzygwiezdnym zapadają się, aby tworzyć

gwiazdy. Nie mamy pełnego rozeznania, dlaczego w pewnych obszarach Drogi Mlecznej nowe gwiazdy powstają, a w innych nie. Wiemy, że wiatry emitowane przez pierwsze gwiazdy powstające w danym obszarze zdmuchują otaczający je gaz i pył, co uniemożliwia powstawanie kolejnych gwiazd. Przeciętna gwiazda, taka jak Słońce, porusza się z przeciętną prędkością około 20 kilometrów na sekundę względem swoich sąsiadów. W ciągu 4,6 miliarda lat, które upłynęły od jej powstania, oddaliła się bardzo daleko od gwiezdnego żłobka, w którym się narodziła (tak, to jest określenie (ang. *stellar nursery*), którego używają astronomowie!). Z tego powodu nie jest możliwe ustalenie, które gwiazdy są jej rodzeństwem pochodzącym z tego samego żłobka. W ciągu setek milionów lat grupy gwiazd rozpraszają się i rozchodzą po całej Drodze Mlecznej; większość starszych gwiazd w dysku Drogi Mlecznej to gwiazdy pojedyncze (jak Słońce), pary lub układy zaledwie kilku gwiazd.

Przedstawiliśmy ogólny obraz narodzin i cykli życiowych gwiazd. Gwiazdy powstają z ośrodka międzygwiezdnego. Gwiazdy o najmniejszej masie nadal spalają swój pierwotny zapas wodoru. Robią to tak oszczędnie, że będą żyć ponad bilion lat. Gwiazdy o masie zbliżonej do masy Słońca lub nieco cięższe staną się czerwonymi olbrzymami i ostatecznie zwrócą część swojego materiału do ośrodka międzygwiezdnego w postaci mgławic planetarnych. Gwiazdy, których masa rdzenia dwukrotnie przekracza masę Słońca (o całkowitej masie na ciągu głównym przewyższającej ponad ośmiokrotnie masę Słońca), eksplodują jako supernowe, rozsiewając w ośrodku międzygwiezdnym cięższe pierwiastki, które wytworzyły w swoich rdzeniach. Te ciężkie pierwiastki mogą następnie trafić do kolejnej generacji gwiazd. W ten sposób ośrodek międzygwiezdny jest sukcesywnie wzbogacany w pierwiastki cięższe od wodoru i helu. Z tych ciężkich pierwiastków zbudowany jest cały świat wokół nas. Na przykład Ziemia jest zbudowana głównie z żelaza, tlenu, krzemu i magnezu. Nasze ciało jest zbudowane głównie z wodoru, węgla, tlenu, azotu oraz niewielkich ilości innych ciężkich pierwiastków. Ciężkie pierwiastki, aż po żelazo, powstają dzięki procesowi fuzji w rdzeniach umierających gwiazd. Pozostałe pierwiastki (aż po uran), które występują w naturalnej postaci we Wszechświecie, powstają: w rdzeniach czerwonych nadolbrzymów, gdy ciężkie pierwiastki łączą się z neutronami; w otoczkach gwiazd, które wybuchają jako supernowe; w zderzeniach gwiazd neutronowych tworzących ściśle związane układy podwójne. Szczegóły tych procesów nadal nie są dobrze zrozumiane i stanowią obszar aktualnych badań.

Droga Mleczna jest jak żywy ekosystem, w którym gwiazdy żyją i umierają. Każda generacja gwiazd dokłada swój materiał do ośrodka międzygwiezdnego, który następnie zostaje wykorzystany w budowie następnej generacji. Ciężkie pierwiastki stanowią surowiec, z którego powstają planety — potencjalne siedliska życia. Wywołuje we mnie pokorę i zarazem wzbudza podziw fakt, że większość materii, z której jesteśmy zbudowani my sami i wszystko wokół nas, została wyprodukowana w termojądrowych procesach we wnętrzach gwiazd.

Wspomniałem wyżej, że pierwiastki cięższe od żelaza mogą powstawać w zderzeniach gwiazd neutronowych tworzących ściśle związane układy podwójne. Russell Hulse i Joe Taylor odkryli dwie gwiazdy neutronowe, każda o masie równej 1,4 masy Słońca, krążące wokół siebie. Okres obiegu wynosi 7,75 godziny, a średnica orbity około 3 sekund świetlnych, nieco mniej niż średnica Słońca. Obie gwiazdy poruszają się wzdłuż spirali, ponieważ emitują fale grawitacyjne. Ten efekt przewiduje ogólna teoria względności Einsteina. Wyniki obserwacji Taylora i Hulse'a pięknie zgadzają się z przewidywaniami teorii. W 1993 roku otrzymali oni nagrodę Nobla. Te dwie gwiazdy neutronowe będą kontynuować swoją powolną spiralę śmierci, aż w końcu za około 300 milionów lat zderzą się i połączą. Enrico Ramirez-Ruiz z University of California w Santa Cruz oszacował, że jedno takie zderzenie może wyrzucić w przestrzeń złoto o masie równej masie Jowisza. Pomyśl o tym, że atomy w twojej ślubnej obrączce mogły powstać miliardy lat temu w zderzeniu dwóch gwiazd neutronowych!

12 – Nasza Droga Mleczna

Michael A. Strauss

Większość gwiazd, które widzisz gołym okiem, jest od nas oddalona o dziesiątki, setki lub tysiące lat świetlnych. Był to pełny zakres znanego nam Wszechświata, dopóki przez teleskopy nie zobaczyliśmy i nie zrozumieliśmy natury obiektów bardziej odległych. Historia astronomii to stopniowe poszerzanie naszej wiedzy o tym, jak duży jest Wszechświat.

W czasach Kopernika naszym Wszechświatem był Układ Słoneczny otoczony przez odległe gwiazdy, o których wiedzieliśmy bardzo niewiele. Galileo Galilei, który pierwszy skierował teleskop w stronę nieba, spostrzegł, że światło Drogi Mlecznej pochodzi od miriad (w istocie od miliardów) pojedynczych gwiazd. Astronomowie szybko uświadomili sobie, że nasza koncepcja Wszechświata musi być znacznie szersza niż sądzono uprzednio.

W 1785 roku William Herschel (który także odkrył Urana) sporządził mapę Drogi Mlecznej, kierując teleskop w różne strony nieba i licząc widoczne przez teleskop gwiazdy. Zakładał, że liczba gwiazd widocznych w pewnym kierunku określa rozmiar Drogi Mlecznej w tym konkretnym kierunku. Na podstawie swoich obserwacji doszedł do wniosku, że Droga Mleczna ma kształt płaskiej soczewki, a my znajdujemy się w pobliżu centrum. W 1922 roku holenderski astronom, Jacobus Kapteyn, przeprowadził bardziej szczegółowy przegląd Drogi Mlecznej. To niesamowite, że Holandia, kraina znana z pochmurnej pogody, dała światu tylu znamienitych astronomów! Podobnie jak Herschel, Kapteyn wykonał dokładne obserwacje liczby gwiazd w różnych kierunkach, wykorzystując bardziej czułą technikę fotograficzną.

To było trudne przedsięwzięcie. Na pewno pamiętasz prawo odwrotnych kwadratów $B = L/(4\pi d^2)$ wiążące jasność obserwowaną B, odległość d oraz moc L gwiazdy. Jeżeli widzimy jasną gwiazdę, to a priori nie wiemy, czy to

gwiazda o bardzo dużej mocy w dużej odległości, czy gwiazda o mniejszej mocy w małej odległości. Kapteyn wykonał większość swojej pracy, zanim Russell i Hertzsprung wykazali, że kolor gwiazdy na ciągu głównym umożliwia określenie jej mocy (zob. rozdział 7). Kapteyn zrobił wszystko najlepiej, jak potrafił, i po wielu latach starannych obserwacji stworzył model Wszechświata, dość podobny do modelu Herschela: Wszechświat Kapteyna miał kształt soczewki o średnicy 40 tysięcy lat świetlnych, ze Słońcem w odległości zaledwie 2 tysięcy lat świetlnych od centrum.

Przed Kopernikiem ludzie uważali Ziemię za centrum Wszechświata. Po Koperniku nowym centrum Wszechświata stało się Słońce. W ciągu kolejnych stuleci astronomowie zaczęli zdawać sobie sprawę, że Słońce jest gwiazdą taką jak te, które widzimy w nocy, lecz Kapteyn także umieścił Słońce mniej więcej w środku całego rozkładu. Ale w tym samym czasie, gdy Kapteyn wykonywał swoje obserwacje, naukowcy zaczęli rozumieć wpływ pyłu obecnego w ośrodku międzygwiezdnym na obserwowaną jasność gwiazd (zob. rozdział 11). Jeżeli nie uwzględni się przyciemniającego wpływu tego pyłu, to wyniki obserwacji mogą dać zniekształcony rozkład gwiazd. Jeżeli pył zasłania gwiazdy w jakimś obszarze nieba, to zobaczysz tam mniej gwiazd. Jeżeli pył jest tak gęsty, że całkowicie zasłania gwiazdy, możesz dojść do błędnego wniosku, iż w rozkładzie gwiazd jest dziura. Gdy astronomowie zaczęli rozumieć, jak gesty i zróżnicowany jest rozkład pyłu w Drodze Mlecznej, zdali sobie sprawę, że obraz Wszechświata proponowany przez Kapteyna jest błędny.

Harlow Shapley, profesor Harvardu, zastosował inne podejście. Wokół Drogi Mlecznej jest rozrzuconych około stu pięćdziesięciu gromad kulistych, z których każda składa się z nie więcej niż miliona gwiazd. Gromady kuliste to piękne obiekty, jak widać na zdjęciu M13 na ilustracji 7.3. W 1918 roku Shapley potrafił oszacować odległości do gromad kulistych i w ten sposób stworzył mapę ich rozkładu w trzech wymiarach. Zakładając, że te gromady są jednym ze składników Drogi Mlecznej, należałoby przypuszczać, że ich rozkład powinien mniej więcej pokrywać się z rozkładem gwiazd, którego mapę próbował sporządzić Kapteyn — czyli mniej więcej symetrycznie wokół Słońca. Odkrycie Shapleya zmieniło naszą percepcję Wszechświata: środek rozkładu gromad kulistych był (według dzisiejszych danych) 25 tysięcy lat świetlnych od Słońca. Słońce było definitywnie poza centrum. Gromady kuliste Shapleya pokazały nam, że Słońce nie znajduje się w środku znanego Wszechświata (czyli Drogi Mlecznej według Shapleya), lecz raczej na peryferiach, a rozmiary Drogi Mlecznej okazały się kilkakrotnie większe, niż sądził Kapteyn. Kapteyna w ogromnym stopniu zmylił ten cały pył. Okazuje się, że pył w Drodze Mlecznej jest skoncentrowany głównie w centralnym dysku, czyli w płaszczyźnie Galaktyki, natomiast większość gromad kulistych leży nad albo pod dyskiem. Pył zniekształcił analizę Kapteyna w większym stopniu niż Shapleya, ponieważ gromady kuliste leżą poza galaktycznym dyskiem. W rezultacie Shapley stał się nowym Kopernikiem, pokazując, że Słońce nie znajduje się w centrum Wszechświata, który mogliśmy wówczas obserwować, czyli w centrum Drogi Mlecznej.

Tak wyglądał znany Wszechświat mniej więcej sto lat temu, gdy Shapley odkrył jego strukturę: płaski dysk (Droga Mleczna), o średnicy około 100 tysięcy lat świetlnych, którego centrum leży 25 tysięcy lat świetlnych od Słońca. Te skale są ogromne: jeden rok świetlny to 10 bilionów kilometrów, więc 100 tysięcy lat świetlnych to niewiarygodnie dużo. Ale po wielkich odkryciach z lat dwudziestych, omówionych w rozdziale 13, stało się jasne, że widzialny Wszechświat jest o wiele rzędów wielkości większy nawet od naszej ogromnej Drogi Mlecznej.

Spróbujmy zwizualizować sobie, jak duża jest Droga Mleczna. Najbliższe gwiazdy leżą w odległości około 4 lat świetlnych, czyli 4×10^{13} kilometrów. Podzielmy to przez średnicę Słońca, czyli 1,4 miliona kilometrów. W ten sposób przekonamy się, ile Słońc trzeba by ułożyć jedno obok drugiego, aby sięgnęły do najbliższej gwiazdy: 30 milionów. Średnica Słońca jest około stu razy większa od średnicy Ziemi. Odległość do najbliższej gwiazdy jest równa 30 milionom Słońc, albo 3 miliardom Ziem ułożonych jedna obok drugiej.

Gwiazdy to maleńkie drobiny w porównaniu z ogromnymi odległościami między nimi. W *Star Treku* za każdym razem, gdy gdzieś polecą, statek „Enterprise" mija jakąś „planetę typu M". Autorzy scenariusza chyba zapomnieli o olbrzymich odległościach między gwiazdami. Zapewne dlatego muszą tak często korzystać z napędu *warp* (i nawet nie wspomnimy o tym, że wszyscy mieszkańcy Galaktyki mają doskonale opanowany dialekt American English, nawet w Kwadrancie Delta!).

Okazuje się, że 4 lata świetlne to typowa odległość między gwiazdami w naszej Galaktyce. Wiemy obecnie, że Droga Mleczna jest bardzo płaską strukturą, okrągłym dyskiem o średnicy około 100 tysięcy lat świetlnych, lecz grubym tylko na mniej więcej tysiąc lat świetlnych. Tysiąc lat świetlnych to ogromna odległość według ludzkich standardów, lecz w porównaniu z pełnym rozmiarem Drogi Mlecznej to w istocie niewiele. Większość pyłu oraz ośrodka międzygwiezdnego znajduje się w dysku. Rozmiar Drogi Mlecznej jest około 25 tysięcy razy większy od przeciętnej odległości między gwiazdami, albo 75 bilionów razy większy od średnicy Ziemi.

Konstelacja Strzelca leży w kierunku centrum Galaktyki. Galaktyczny pył jest skoncentrowany w dysku Drogi Mlecznej, więc centrum Drogi Mlecznej jest okryte pyłem jak całunem, który zasłania nam widok. Na fotografiach Drogi Mlecznej w pewnych obszarach galaktycznego dysku widzimy niewiele gwiazd, co sugeruje szczególnie gęste obłoki pyłu ukrywające za sobą gwiazdy. Słońce leży w tym dysku, lecz jeśli patrzymy w innych kierunkach, nie w płaszczyźnie dysku Galaktyki, natrafiamy na niewiele pyłu i mamy czysty widok Wszechświata poza naszą Galaktyką.

Słońce i Ziemia leżą blisko płaszczyzny Drogi Mlecznej. Gwiazdy Drogi Mlecznej są także w większości skoncentrowane w tym płaskim dysku, więc największe skupiska gwiazd widzimy w pasie, który zatacza pełny okrąg na sferze niebieskiej. W danym momencie widzimy ponad horyzontem tylko część tego okręgu[1]; reszta jest pod naszymi stopami, zasłonięta przez Ziemię. Na półkuli północnej najlepszy widok mamy w kierunku od centrum

Galaktyki. Ziemia i Słońce znajdują się daleko od centrum, więc względnie niewiele gwiazd leży w tym kierunku i pas Drogi Mlecznej nie robi wrażenia bardzo gęstego. Natomiast na półkuli południowej mamy widok wprost w kierunku środka Drogi Mlecznej i widok robi większe wrażenie, mimo wyraźnie widocznej obecności pyłu. W bezchmurną, bezksiężycową noc w maju, daleko od miejskich świateł w Chile, widok zapiera dech. Wśród moich najmilszych wspomnień pozostanie czas, który spędziłem, patrząc na gwiazdy w Obserwatorium Cerro Tololo w Chile, obok kobiety, którą później poślubiłem, z Drogą Mleczną rozścieloną na niebie nad naszymi głowami.

Jeszcze lepszy widok Drogi Mlecznej możemy mieć w świetle podczerwonym. Wspomnieliśmy w rozdziale 11, że pył osłabia czerwone światło w mniejszym stopniu niż światło niebieskie. Podczerwone światło jest osłabiane w jeszcze mniejszym stopniu. Na ilustracji 12.2 przedstawiona jest podczerwona mapa całego nieba, wykonana teleskopami 2MASS (w ramach tego samego przeglądu, który wykonał oszałamiające zdjęcie centrum Galaktyki, widoczne na il. 11.2). Cienki dysk Drogi Mlecznej zajmuje całą szerokość zdjęcia, a w środku widoczne jest centralne zgrubienie galaktyczne.

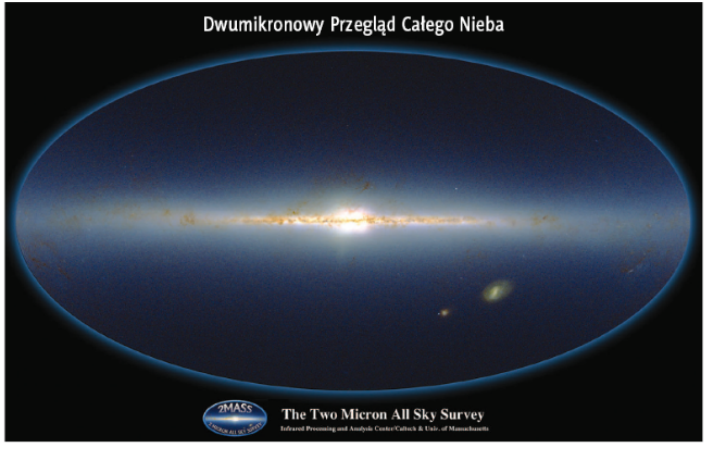


ILUSTRACJA 12.1. Droga Mleczna nad Cerro Tololo. Widok nocnego nieba nad Cerro Tololo Inter-American Observatory w chilijskich Andach. Duża kopuła na środku zdjęcia mieści 4-metrowy teleskop Victora Blanco. Centrum Drogi Mlecznej jest widoczne blisko prawej krawędzi zdjęcia. Wielki i Mały Obłok Magellana, oddalone mniej więcej o 150 tysięcy lat świetlnych, sąsiadki Drogi Mlecznej, są widoczne po lewej stronie

Photo credit: Roger Smith, AURA, NOAO, NSF

Taka mapa podczerwonego nieba jest analogiczna do mapy z ilustracji 11.1 wykonanej w świetle widzialnym. Poziomy „równik" na środku to płaszczyzna galaktyki; dysk Drogi Mlecznej, który jest pełnym okręgiem na sferze

niebieskiej, na tej mapie jest widoczny jako prosta, pozioma linia. Ilustracja 12.2 jest wprawdzie oparta na danych w podczerwieni, ale pył Drogi Mlecznej nadal utrudnia obserwacje. Widoczny na zdjęciu niejednorodny obraz dysku to dowód obecności pyłu. Na koniec zwróćmy uwagę na zgrubienie w centrum Drogi Mlecznej. Nieco wydłużony, grudkowaty wygląd stanowi wskazówkę, że nie jest sferyczne, jak początkowo sądzono, lecz ma kształt ziemniaka. Wielki i Mały Obłok Magellana, satelitarne galaktyki Drogi Mlecznej, są widoczne po prawej stronie poniżej płaszczyzny Galaktyki.



ILUSTRACJA 12.2. Droga Mleczna w podczerwieni. Rozkład gwiazd na całym niebie zmierzony w ramach 2MASS, przy długości fali, dla której osłabienie światła przez pył jest niewielkie. Płaszczyzna Drogi Mlecznej przecina poziomo środek mapy wzdłuż równika galaktycznego. Galaktyki Wielki i Mały Obłok Magellana są widoczne poniżej płaszczyzny

Photo credit: atlas zdjęć (mozaika) wykonany w ramach 2MASS, wspólny projekt University of Massachusetts oraz Infrared Processing and Analysis Center/California Institute of Technology, sfinansowany przez NASA oraz NSF

Harlow Shapley zdawał sobie sprawę, że musi patrzeć poza płaszczyznę (gdzie światło osłabiają dominujące efekty wynikające z obecności pyłu), aby zrekonstruować trójwymiarową strukturę Drogi Mlecznej. Gromady kuliste Drogi Mlecznej nie są skoncentrowane w tej płaszczyźnie, dzięki czemu są widoczne na całym niebie. Shapley chciał sporządzić trójwymiarową mapę ich rozkładu, więc musiał pomierzyć ich odległości. W zasadzie jest to proste zadanie wykorzystujące prawo odwrotnych kwadratów, które wiąże jasność obserwowaną z mocą: $B = L/(4\pi d^2)$. Jeżeli zmierzymy jasność obserwowaną jakiejś gwiazdy w gromadzie kulistej (to jest prosta część zadania) i jeżeli znamy moc gwiazdy (to trudna część zadania), to możemy wyliczyć jej odległość d. Poprawki wynikające z obecności pyłu będą względnie niewielkie, ponieważ patrzymy na gromadę kulistą poza płaszczyzną Drogi Mlecznej.

Jak zmierzyć moc gwiazdy? Ciąg główny pokazuje związek między kolorem gwiazdy i jej mocą (zob. il. 7.1). Zakładając, że nasze przyrządy są na tyle czułe, aby zidentyfikować gwiazdy ciągu głównego w gromadzie kulistej, kolory gwiazd ciągu głównego pozwolą nam wnioskować o ich mocy; kojarząc kolory z pomiarami jasności obserwowanej, możemy wyznaczyć odległości dzięki prawu odwrotnych kwadratów.

Ach, gdyby życie było aż tak proste. Gwiazdy, które najłatwiej namierzyć w gromadzie kulistej, to oczywiście te, które są najjaśniejsze. Wszystkie gwiazdy danej gromady są mniej więcej w takiej samej odległości od nas, więc te, które widzimy jako najjaśniejsze w rzeczywistości są najsilniejsze (emitują najwięcej mocy). Ale to nie są gwiazdy ciągu głównego, lecz na ogół czerwone olbrzymy, które charakteryzuje znaczny rozrzut mocy przy określonym kolorze (za względu na znaczny rozrzut rozmiarów przy określonym kolorze). Współczesne teleskopy mają wystarczającą czułość, aby obserwować znacznie słabsze gwiazdy ciągu głównego w gromadach kulistych, ale w 1918 roku, gdy Shapley prowadził swoje obserwacje, ówczesne teleskopy i przyrządy nie dawały takich możliwości, więc wykorzystał typ pulsujących gwiazd zmiennych, zwany RR Lyrae. Są to gwiazdy około pięćdziesięciu razy mocniejsze od Słońca, a ich jasność zmienia się periodycznie w czasie.

Gwiazdy zmienne charakteryzują się tym, że ich moc (a zatem także obserwowana jasność) nie jest stała. Gwiazdy zmienne RR Lyrae zmieniają swoją jasność o czynnik 2 w skali czasu poniżej jednej doby. One pulsują — ich promień regularnie się zmniejsza i zwiększa. To typowe gwiazdy zmienne obserwowane w gromadach kulistych.

Wiemy, że gwiazdy utrzymują równowagę między grawitacją, która je ściska od zewnątrz, a ciśnieniem, które od wewnątrz przeciwstawia się grawitacji. Ale niektóre gwiazdy, gdy stają się czerwonymi olbrzymami, robią się bardziej niebieskie i przemieszczają się szybko przez diagram HR. W tym czasie przechodzą przez fazę, podczas której hel spala się w rdzeniu, wodór spala się w powłoce otaczającej rdzeń, a równowaga gwiazdy zależy od tego, w jaki sposób energia wytwarzana we wnętrzu znajduje drogę na zewnątrz. Ciśnienie wewnątrz gwiazdy oscyluje, co powoduje okresowe zmiany rozmiarów oraz mocy (a zatem i obserwowanej jasności) gwiazdy.

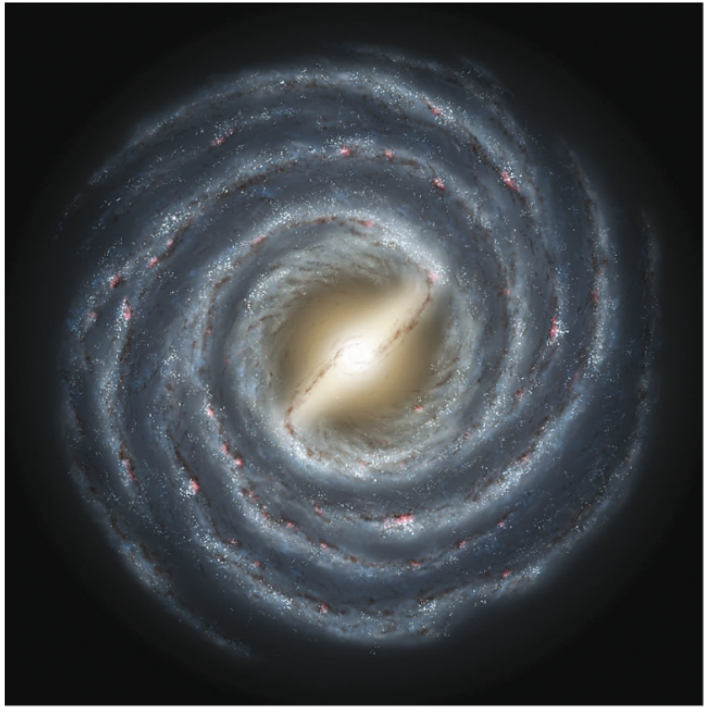
Astronomowie zwykle nadają proste nazwy obiektom swoich badań („czerwony olbrzym”, „biały karzeł” itp.), lecz gwiazdy zmienne stanowią wyjątek. Gdy na początku XIX wieku po raz pierwszy zaczęto katalogować gwiazdy zmienne, dali im zlatynizowane nazwy pochodzące od konstelacji, w której się znajdowały. Pierwsza gwiazda zmienna odkryta w konstelacji Lutni (ang. Lyra, Harp), została nazwana R Lyrae; litery od A do Q były już zajęte przez inne rodzaje gwiazd. Gdy druga gwiazda zmienna została odkryta w Lutni, dostała nazwę S Lyrae, następnie T Lyrae i tak dalej. Gdy doszli do Z Lyrae i skończyły się litery, następna została nazwana RR Lyrae (i stała się eponimem całego typu podobnych do niej gwiazd), potem RS Lyrae i tak dalej, aż do ZZ Lyrae. Ponownie zabrakło liter, więc zawrócili do AA Lyrae, AB Lyrae i tak dalej, aż doszli od drugiej strony do QZ Lyrae (z jakiegoś powodu pomijając literę J) i znowu się zablokowali. To daje 334 kombinacje, ale gwiazd zmiennych jest więcej! Następna gwiazda odkryta w konstelacji Lutni została nazwana V335 Lyrae. W momencie, gdy piszę ten tekst, astronomowie doszli do V826 Lyrae. Znane jest wiele typów gwiazd zmiennych, a terminologia w tej dziedzinie staje się rzeczywiście skomplikowana: mamy gwiazdy AM Canum venaticorum, FU Orionis, BL Lacertae (które zresztą okazały się dziwacznym typem galaktyki ze zmiennym galaktycznym jądrem), ZZ Ceti i tak

dalej. Każdy kolejny typ dostaje nazwę po pierwszym odkrytym egzemplarzu. Cefeidy, które w rozdziale 13 odegrają kluczową rolę w badaniach odległych galaktyk, zostały nazwane od ich prototypu, Delta Cephei, odkrytego pod koniec XVIII wieku.

Shapley wykorzystał gwiazdy zmienne RR Lyrae jako świece standardowe, aby mierzyć odległości do gromad kulistych. Wykorzystał przy tym fakt, że moc wszystkich gwiazd RR Lyrae (po uśrednieniu ich zmienności czasowej) jest w przybliżeniu jednakowa. Mierząc (średnią) jasność obserwowaną gwiazdy RR Lyrae w gromadzie kulistej i znając jej moc, mógł obliczyć jej odległość, a tym samym odległość gromady kulistej, w której ta gwiazda leży. W ten sposób sporządził trójwymiarową mapę gromad kulistych, znalazł położenie środka ich rozkładu i odkrył, że Słońce leży daleko od centrum Drogi Mlecznej.

Zastosowanie metody świec standardowych do badania rozkładu gwiazd w płaszczyźnie Drogi Mlecznej (czyli tam, gdzie leży większość gwiazd) jest znacznie trudniejsze ze względu na obecność pyłu. W wyniku wielu dekad wytężonej pracy mamy obecnie umiarkowanie kompletny obraz ogólnej struktury Drogi Mlecznej. Większość gwiazd znajduje się w bardzo spłaszczonym dysku o średnicy około 100 tysięcy lat świetlnych. Galaktyka nie ma dobrze określonej zewnętrznej granicy; gęstość gwiazd stopniowo się zmniejsza w miarę oddalania się od środka. W centrum dysku znajduje się grubszy układ gwiazd, mniej więcej w kształcie ziemniaka, o średnicy około 20 tysięcy lat świetlnych, który nazywamy zgrubieniem Drogi Mlecznej. Gwiazdy w dysku są ułożone w szeregu spiralnych ramion wychodzących z centralnego zgrubienia. Większość gwiazd, które widzisz gołym okiem, znajduje się w odległości kilku tysięcy lat świetlnych od Słońca, w tym samym spiralnym ramieniu, w którym leży Słońce.

Droga Mleczna jest galaktyką spiralną w kształcie wiatraczka, ale nie możemy zobaczyć tego wiatraczka na niebie, ponieważ sami wisimy na jednym z jego ramion. Wiatraczek Drogi Mlecznej staje się widoczny dopiero wtedy, gdy pomierzymy odległości do poszczególnych gwiazd i sporządzimy trójwymiarowy obraz struktury Galaktyki. Gdybyśmy w jakiś sposób mogli przenieść się do punktu widokowego oddalonego o 100 tysięcy lat świetlnych od płaszczyzny Galaktyki, aby spojrzeć na nią z góry, zobaczylibyśmy coś podobnego do artystycznej koncepcji przedstawionej na ilustracji 12.3. Słońce znajduje się mniej więcej w połowie spiralnego ramienia, dokładnie poniżej centrum (na godzinie 18 na il. 12.3). Droga Mleczna jest galaktyką spiralną z poprzeczką, ponieważ jej zgrubienie ma kształt poprzeczki. Spiralne ramiona wychodzą z końców poprzeczki.



ILUSTRACJA 12.3. Symulacja widoku Drogi Mlecznej z góry

Photo credit: NASA Chandra Satellite

Niedługo po naszym ślubie moja żona zabroniła mi nosić moje T-shirty z czasów studenckich. Najbardziej tęsknię do tego, na którym znajduje się obraz Galaktyki ze spiralnymi ramionami, poprzeczką i całą resztą oraz ze strzałką wskazującą punkt w połowie spiralnego ramienia, opatrzoną napisem „Jesteś tutaj".

Nie wszystkie gwiazdy Drogi Mlecznej znajdują się w spiralnych ramionach lub w zgrubieniu. Widzieliśmy już, że gromady kuliste mają mniej więcej sferyczny rozkład rozciągający się poniżej i powyżej dysku. Jest także pewna liczba gwiazd (znacznie mniejsza niż liczba gwiazd w dysku), które tworzą sferyczne halo, rozciągające się na 50 tysięcy lat świetlnych wokół centrum Galaktyki. Początkowo sądziliśmy, że rozkład gwiazd w tym halo jest w miarę gładki, a gęstość stopniowo spada wraz z odległością od centrum Galaktyki. Okazało się jednak, w miarę jak rosła dokładność map tego rozkładu, że wcale nie jest taki gładki. Jest pełen grudek i strumieni. Prawdopodobnie są to pozostałości po mniejszych galaktykach, byłych towarzyszkach Drogi Mlecznej, które wpadają do Drogi Mlecznej i są rozszarpywane przez grawitacyjne siły pływowe.

Gwiazdy w zgrubieniu, a także gwiazdy w halo, to często stare gwiazdy uformowane miliardy lat temu. Nie ma tam najgorętszych gwiazd ciągu głównego typu O i B, które żyją zaledwie kilka milionów lat. Od wielu miliardów lat nie zachodzą procesy formacji gwiazd w halo Galaktyki. Młode, gorące gwiazdy są widoczne niemal wyłącznie w spiralnych ramionach dysku, gdzie formowanie gwiazd trwa nadal.

Spiralna struktura dysku, przypominająca kształtem wiatraczek, sugeruje, że Galaktyka wiruje. I rzeczywiście, cały dysk wiruje wokół osi przechodzącej przez środek. W szczególności Słońce krąży po niemal kołowej orbicie z

prędkością 220 kilometrów na sekundę. Podobnie jak grawitacja Słońca trzyma Ziemię na jej rocznej orbicie wokółsłonecznej, tak grawitacja Drogi Mlecznej (a przynajmniej tej części, która mieści się wewnątrz orbity Słońca) trzyma Słońce, wraz z całym Układem Słonecznym, na orbicie wokół centrum Galaktyki. Znając prędkość (220 km/s) oraz promień orbity (25 tysięcy lat świetlnych), łatwo obliczyć, że Słońce okrąża środek Drogi Mlecznej raz na 250 milionów lat. W ciągu mniej więcej 4,6 miliarda (ziemskich) lat od swych narodzin Słońce wykonało około osiemnastu okrążeń Galaktyki.

Aby obliczyć siłę grawitacji, z jaką Droga Mleczna działa na Słońce, możemy potraktować Drogę Mleczną tak, jakby cała jej masa była skupiona w środku, w odległości 25 tysięcy lat świetlnych od nas. Na tej samej zasadzie grawitacja Ziemi działa na ciebie w taki sposób, jakby cała masa Ziemi była skupiona w środku Ziemi, 6,4 tysiąca kilometrów pod twoimi stopami. Masa, którą należy uwzględnić, to część Galaktyki, która sięga od środka do promienia orbity, po której porusza się Słońce. Grawitacyjne oddziaływanie materii, która znajduje się poza tym promieniem, sumuje się mniej więcej do zera, ponieważ różne obszary ciągną w różnych kierunkach.

Możemy wykonać następujące obliczenia. Wychodząc od praw Newtona oraz prawa grawitacji, w rozdziale 3 wyprowadziliśmy związek między masą Słońca M_S, orbitalną prędkością Ziemi v_E oraz promieniem wokółsłonecznej orbity Ziemi r_E:

$$GM_S/r^2_E = v_E{}^2/r_E,$$

gdzie G jest stałą grawitacji. Jeżeli pomnożymy obie strony równania przez r_E^2, dostaniemy:

$$GM_S = v_E{}^2 r_E.$$

Możemy teraz napisać analogiczne równanie, w którym będziemy mieć związek między masą Galaktyki M_{MW}, orbitalną prędkością Słońca v_S oraz promieniem orbity Słońca wokół Galaktyki R_S:

$$GM_{MW} = v_S{}^2 R_S.$$

Podzielmy drugie równanie przez pierwsze. Zniknie stała G:

$$M_{MW}/M_S = (v_S/v_E)^2 (R_S/r_E).$$

Stosunek prędkości wynosi (v_S/v_E) = (220 km/s)/(30 km/s), czyli około 7. Stosunek promieni wynosi (R_S/r_E) = 25 tysięcy lat świetlnych/1 AU. W jednym roku świetlnym jest około 60 tysięcy AU, więc ten stosunek wynosi 25 000 × 60 000 = 1,5 ×10^9. Ostatecznie:

$$M_{MW}/M_S = 7^2 \times 1{,}5 \times 10^9 \sim 10^{11}.$$

Czyli masa Drogi Mlecznej (wewnątrz promienia orbity Słońca) jest mniej więcej 100 miliardów razy większa od masy Słońca.

Droga Mleczna składa się z gwiazd, więc moglibyśmy powiedzieć, że nasza Galaktyka zawiera mniej więcej 100 miliardów gwiazd, aczkolwiek zrobilibyśmy dwa nieuprawnione założenia: że wszystkie gwiazdy mają taką samą masę jak Słońce (średnia masa gwiazdy w Drodze Mlecznej jest w rzeczywistości nieco mniejsza niż masa Słońca); pominęliśmy gwiazdy leżące dalej od centrum Galaktyki niż Słońce. Bardziej dokładne oszacowanie daje liczbę 300 miliardów gwiazd w Drodze Mlecznej. Carl Sagan w swoim klasycznym telewizyjnym serialu *Kosmos* często swoim charakterystycznym głosem powtarzał sformułowanie „miliardy i miliardy" (ang. *billions and billions*). I nie przesadzał — Droga Mleczna rzeczywiście zawiera miliardy i miliardy — mniej więcej 300 miliardów — gwiazd. Użyliśmy tej liczby w równaniu Drake'a.

Wszystkie gwiazdy w dysku krążą w przybliżeniu po kołowych orbitach. Są jak auta na kołowym torze wyścigowym. Te, które krążą po wewnętrznych orbitach, wyprzedzają maruderów krążących po bardziej zewnętrznych orbitach. Spiralne ramiona są konsekwencją korków drogowych. Jeżeli jedziesz autostradą i trafiasz na korek, w którym auta jadą wolniej, to zwalniasz i jedziesz dalej tak jak reszta. Gdy korek się rozluźni, przyspieszasz, podobnie jak inne auta wokół ciebie. Korek drogowy reprezentuje falę gęstości w ruchu samochodowym. Auta w korku są gęściej upakowane, aczkolwiek pojedyncze auta wciąż poruszają się do przodu i stopniowo wydostają się z korka. Na podobnej zasadzie spiralna fala gęstości w galaktyce reprezentuje grawitacyjny korek gwiezdny, którego grawitacja przyciąga jeszcze więcej gwiazd. Co więcej, gdy gwiazdy tworzą korek, międzygwiezdny gaz jest przyciągany przez ich grawitację, obłoki gazu gęstnieją, następnie zapadają się i tworzą się nowe gwiazdy. Ramiona spiralne stanowią obszary aktywnego formowania gwiazd. Wśród nowo narodzonych gwiazd zdarzają się bardzo masywne, jasne, niebieskie gwiazdy, które żyją tak krótko, że w ciągu swego życia nie zdążą opuścić korka (spiralnego ramienia, w którym się rodzą). W rezultacie w ramionach spiralnych galaktyk świecą nowo narodzone, masywne, niebieskie gwiazdy. Gwiazdy nie podróżują po spiralach, lecz w ramionach spiralnych świecą jasno gwiazdy, które rodzą się w korkach i wraz z ramionami okrążają centrum galaktyki.

Masa 100 miliardów Słońc, którą przed chwilą oszacowaliśmy, reprezentuje tę część Drogi Mlecznej, która znajduje się wewnątrz orbity Słońca. Obszary Galaktyki, które leżą poza orbitą Słońca, ciągną nas w przeciwnych kierunkach: materia poza orbitą Słońca po naszej stronie Galaktyki ciągnie nas na zewnątrz, natomiast materia poza okręgiem orbity Słońca, lecz po drugiej stronie Galaktyki, ciągnie nas do środka. Te przeciwne siły efektywnie znoszą się nawzajem i nie mają wpływu na orbitalny ruch Słońca. Materia wewnątrz orbity Słońca działa na Słońce w taki sam sposób, jak działałaby, gdyby cała była skupiona w centrum Galaktyki (na tej samej zasadzie grawitacja Ziemi działa na ciebie w taki sposób, jakby cała masa Ziemi była skupiona w środku Ziemi). W takim razie, gdybyśmy potrafili zmierzyć orbitalne prędkości gwiazd krążących w różnych odległościach od centrum Galaktyki, moglibyśmy

stworzyć mapę masy Galaktyki — profil masy Drogi Mlecznej w funkcji odległości od centrum Galaktyki.

Czego oczekujemy? Słońce jest mniej więcej w połowie między centrum i zewnętrzną granicą Drogi Mlecznej, a gęstość gwiazd zmniejsza się znacząco na dalszych odległościach. Oszacowania liczby gwiazd sugerują, że większa część masy Drogi Mlecznej znajduje się wewnątrz orbity Słońca. Możemy zatem zastosować wzór, który przed chwilą wyprowadziliśmy:

$$GM(<R) = v^2R,$$

gdzie $M(<R)$ jest równe masie wnętrza o promieniu R. Jeżeli poza promieniem orbity Słońca nie ma dużo masy, to $M(<R)$ jest w przybliżeniu stałe, więc spodziewamy się, że v^2R będzie w przybliżeniu stałe, a zatem v^2 będzie w przybliżeniu proporcjonalne do $1/R$. Zatem orbitalne prędkości v poza orbitą Słońca powinny się skalować proporcjonalnie do $1/\sqrt{R}$. Podobne zachowanie obserwujemy w Układzie Słonecznym — zewnętrzne planety czują słabsze grawitacyjne przyciąganie Słońca, a zatem poruszają się wolniej na swoich orbitach niż planety wewnętrzne. Spodziewaliśmy się, że orbitalne prędkości gwiazd poza orbitą Słońca zmniejszają się wraz z odległością.

Wykonanie takich obserwacji w Drodze Mlecznej jest trudne i dopiero w połowie lat osiemdziesiątych astronomowie zdołali zmierzyć orbitalne prędkości gwiazd i gazu w pewnym zakresie odległości od centrum Drogi Mlecznej. Ku swojemu wielkiemu zaskoczeniu odkryli, że orbitalne prędkości nie zmniejszają się w zewnętrznej strefie Drogi Mlecznej, lecz pozostają w przybliżeniu stałe, w granicach dokładności pomiarów.

Gdzie jest błąd w naszym rozumowaniu? Widzieliśmy niewiele gwiazd poza granicą orbity Słońca, więc wyciągnęliśmy wniosek, że na tych odległościach przyczynek do masy Galaktyki jest niewielki. Musimy teraz zakwestionować to wnioskowanie. Wykorzystaliśmy orbitę Słońca, aby obliczyć masę Drogi Mlecznej wewnątrz tej orbity; na tej samej zasadzie możemy wykorzystać prędkość gwiazdy krążącej na jeszcze dalszej orbicie, aby obliczyć masę Drogi Mlecznej wewnątrz takiej większej orbity. Wykorzystując nasz wzór $GM(<R) = v^2R$, widzimy, że skoro v pozostaje stałe, to masa wewnątrz promienia R rośnie liniowo z R. Im dalej idziesz, tym więcej masy znajdujesz. Znaczna część masy Drogi Mlecznej poza orbitą Słońca po prostu nie jest widoczna w postaci gwiazd. Nazywamy ją ciemną materią. Wywnioskowaliśmy jej istnienie wyłącznie na podstawie jej grawitacyjnego oddziaływania na orbity gwiazd.

Ile ciemnej materii zawiera Droga Mleczna? Odpowiedź zależy od tego, jak daleko w przestrzeń rozciąga się nasza Droga Mleczna. Najdalsze gwiazdy znajdują się w okolicy 40 tysięcy lat świetlnych od centrum, ale orbitalna prędkość jeszcze dalszych, pojedynczych gwiazd lub obłoków gazu jest wciąż taka sama jak prędkość Słońca (220 km/s). Nasze najnowsze, najlepsze oszacowania mówią, że gwiazdy oraz ośrodek międzygwiezdny reprezentują tylko niewielki ułamek, być może 10% całkowitej masy Drogi Mlecznej. Większość masy Drogi Mlecznej, mniej więcej bilion mas Słońca, istnieje w formie ciemnej materii rozciągającej się prawdopodobnie na 250 tysięcy lat

świetlnych od środka. Takie same wyniki dostajemy, gdy policzymy — ponownie stosując Newtonowskie prawo grawitacji — wzajemne orbity Drogi Mlecznej i jej towarzyszki, Galaktyki Andromedy. Te dwie galaktyki niegdyś oddalały się od siebie w ramach ogólnej ekspansji Wszechświata, a obecnie spadają na siebie z prędkością około 100 km/s, dążąc do kolizji za około 4 miliardy lat.

Fritz Zwicky, astronom z Caltechu, odkrył ciemną materię w 1933 roku, gdy zmierzył całkowitą masę gromady galaktyk zwanej Coma (gromada Warkocz Bereniki, Abell 1656), stosując nieco bardziej wyrafinowaną wersję wzoru $GM = v^2R$, mierząc prędkość pojedynczych galaktyk — poruszających się w polu grawitacji całej gromady — w funkcji odległości od środka gromady. Zwicky doszedł do wniosku, że masa gromady jest znacznie większa niż suma mas wszystkich gwiazd oraz gazu tworzących materię pojedynczych galaktyk, które obserwujemy. Resztę nazwał dunkle Materie w swoim ojczystym języku niemieckim, co na język angielski tłumaczy się jako *dark matter* a na język polski „ciemna materia". W rozdziale 15 wyjaśnimy, że ciemna materia niemal na pewno nie jest zbudowana ze zwykłych atomów, lecz raczej z cząstek elementarnych, których jeszcze nie zdołaliśmy zidentyfikować.

Inna forma niewidocznej materii znajduje się w samym środku Drogi Mlecznej. Dzięki obserwacjom w podczerwieni, które pozwalają przeniknąć przez pyły zasłaniające centrum Galaktyki, widzimy gwiazdy w samym środku, krążące po eliptycznych, Keplerowskich orbitach. Półosie wielkie tych orbit są nie większe niż 1000 AU (1/60 roku świetlnego), a okresy około dwudziestu lat. Obiekt, wokół którego krążą, jest niewidoczny, ale prawa Newtona pozwalają obliczyć jego masę: 4 miliony mas Słońca. Jest bardzo mały (z pewnością mniejszy od orbit krążących wokół niego gwiazd), a zatem wyjątkowo gęsty i niewidoczny. Okazuje się, że jest to czarna dziura, jeden z najbardziej fascynujących obiektów we Wszechświecie. W ten sposób nasze rozważania na temat Drogi Mlecznej zaprowadziły nas na dwie granice fizyki: do nowych cząstek elementarnych zamieszkujących peryferia galaktyk oraz do masywnej czarnej dziury czającej się w samym środku Galaktyki. Czarnym dziurom będą poświęcone rozdziały 16 i 20.

13 – Wszechświat galaktyk

Michael A. Strauss

Sto lat temu, gdy Harlow Shapley badał rozmiary Drogi Mlecznej oraz nasze położenie w jej wnętrzu, wśród astronomów panowała zgoda co do tego, że cały Wszechświat jest ograniczony do Drogi Mlecznej. Gdy Shapley wykazał, że Droga Mleczna rozciąga się na dziesiątki tysięcy lat świetlnych, był przekonany, że ten ogromny obszar jest w istocie tożsamy z całym Wszechświatem. Lecz astronomów od dawna intrygowały mgławice. O ile obserwowana przez teleskop gwiazda wygląda jak punkt, o tyle mgławice są rozciągłe i często zamazane. Spotkaliśmy już w tej książce różne typy mgławic,

łącznie z mgławicami planetarnymi, które powstają, gdy czerwone olbrzymy odrzucają swoje zewnętrzne warstwy; Mgławicę Oriona, obszar intensywnego formowania gwiazd, w którym otaczający je gaz fluoryzuje pod wpływem światła gorących, młodych gwiazd; a nawet ciemne mgławice, obłoki pyłu, które blokują światło gwiazd tła. Istnieje jeszcze jeden typ ze względu na ich kształt zwany mgławicami spiralnymi. Obecnie wiemy, że kształtem przypominają Drogę Mleczną. Droga Mleczna także jest zamazana, lecz spiralna struktura jej dysku z pewnością nie była znana sto lat temu. Żyjącym wewnątrz dysku i nieznającym trójwymiarowej struktury Drogi Mlecznej ówczesnym astronomom trudno było dostrzec jej podobieństwo do szerszej klasy obiektów. Nie mając percepcji głębi na astronomicznym zdjęciu, nie potrafili a priori orzec, czy konkretna mgławica jest niewielkim obiektem w odległości, powiedzmy, kilkuset lat świetlnych, czy prawdziwie ogromną strukturą miliony lat świetlnych dalej.

Na ilustracji 13.1 widoczna jest typowa mgławica spiralna, M101, obserwowana z góry. Doskonale widoczne są jej spiralne ramiona ułożone w kształcie wiatraczka — dlatego astronomowie nazywają ją galaktyką Wiatraczek.

W pierwszym dziesięcioleciu XX wieku jedno z największych wyzwań w astronomii stanowiła fizyczna struktura, odległości i rozmiary mgławic spiralnych. Niemiecki filozof, Immanuel Kant, już w 1755 roku spekulował, że mgławice spiralne to „wyspowe wszechświaty", czyli obiekty równie duże jak cały znany ówcześnie Wszechświat, Droga Mleczna. Biorąc pod uwagę określone przez Shapleya rozmiary Drogi Mlecznej oraz niewielkie rozmiary kątowe mgławic spiralnych, oznaczałoby to zadziwiająco duże odległości, miliony lub dziesiątki milionów lat świetlnych od nas.

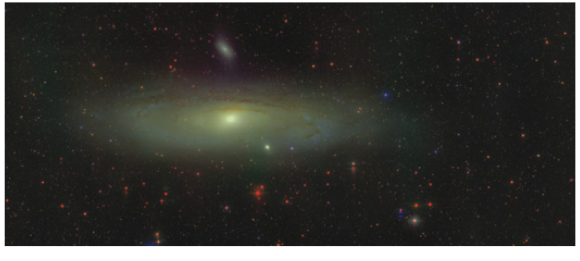
Sam Shapley uważał tę koncepcję za całkowicie nieprawdopodobną. W 1920 roku wziął udział w publicznej dyskusji z astronomem, Heberem Curtisem z Lick Observatory w Kalifornii, na temat natury mgławic spiralnych. Curtis był przekonany, że poprawna jest hipoteza, zgodnie z którą mgławice spiralne są galaktykami takimi samymi jak Droga Mleczna. Shapley uważał, że wynikające z rozmiarów kątowych odległości mgławic spiralnych są o wiele za duże, aby mogły być wiarygodne. W nauce takie kontrowersje zazwyczaj są rozstrzygane przez nowe, lepsze dane, więc sama debata nie została rozstrzygnięta. Definitywne rozstrzygnięcie nastąpiło za sprawą obserwacji wykonanych przez Edwina Hubble'a z Mount Wilson Observatory w Kalifornii. Hubble wykorzystał gwiazdy zmienne (technika takich obserwacji jest opisana w rozdziale 12), aby zmierzyć odległość Mgławicy Andromedy, najjaśniejszej widocznej na niebie mgławicy spiralnej (il. 13.2).

W idealnych warunkach (bezchmurna, bezksiężycowa noc daleko od miejskich świateł) Mgławica Andromedy jest widoczna gołym okiem i w istocie była już znana starożytnym.



ILUSTRACJA 13.1. M101, galaktyka Wiatraczek

Photo credit: NASA/HST



ILUSTRACJA 13.2. Galaktyka Andromedy, sfotografowana w ramach Sloan Digital Sky Survey. Galaktyka Andromedy jest spiralą widoczną niemal idealnie z boku. Towarzyszą jej dwie małe eliptyczne galaktyki satelitarne (M32 poniżej, NGC205 powyżej)

Photo credit: Sloan Digital Sky Survey, Doug Finkbeiner

Mount Wilson Observatory, położone w górach San Gabriel nad doliną Los Angeles, było wyposażone w największy ówczesny teleskop; jego główne lustro miało średnicę 100 cali (254 cm). Gdy Hubble wykonał pierwsze obserwacje Mgławicy Andromedy, przekonał się, że jej rozmazane światło rozdzieliło się i okazało się, że w rzeczywistości pochodzi od pojedynczych gwiazd (trzysta lat wcześniej podobnego odkrycia dokonał Galileusz, gdy skierował swój prymitywny teleskop na Drogę Mleczną). Już to oznaczało, że mgławica musi leżeć bardzo daleko, lecz zmierzenie tej odległości wymagało więcej pracy. Dzięki wielokrotnie powtarzanym obserwacjom Andromedy Hubble był w stanie zidentyfikować kilka gwiazd, które okresowo zmieniały swoją jasność. Były to cefeidy, jaśniejsze od RR Lyrae gwiazdy zmienne o okresie zmienności sięgającym od kilku dni do kilku miesięcy. W 1912 roku Henrietta Leavitt, która pracowała na Harvardzie (zob. rozdział 7), odkryła związek między okresem zmienności i mocą cefeid (il. 13.3). Hubble zmierzył ich okresy oraz jasność obserwowaną, a następnie obliczył ich odległości, wykorzystując odkrycie Leavitt. Wynik był oszałamiający: Mgławica Andromedy leży w niewiarygodnie dużej odległości niemal miliona lat świetlnych, daleko poza znanymi rozmiarami Drogi Mlecznej.

Kątowa szerokość Mgławicy Andromedy, widocznej na zdjęciach aż po zewnętrzne granice, wynosi 2°. Obwód okręgu wynosi 2π (nieco więcej niż 6)

razy promień. Zatem obwód gigantycznego okręgu o promieniu nieco mniejszym niż milion lat świetlnych wynosi około 6 milionów lat świetlnych. Dwa stopnie zajmują 1/180 część z 360°, więc Hubble wydedukował, że średnica Mgławicy Andromedy musi być równa: około 6 milionów lat świetlnych podzielonych przez 180, czyli około 30 tysięcy lat świetlnych. Ze swoich obserwacji i z obliczeń Hubble wyciągnął dwa przekonujące wnioski: (1) Mgławica Andromedy jest niemal tak duża jak sama Droga Mleczna, (2) Andromeda leży daleko poza granicami Drogi Mlecznej.



ILUSTRACJA 13.3. Henrietta Leavitt, która odkryła związek między okresem zmienności i mocą cefeid. Jej odkrycie umożliwiło pomiary odległości sąsiednich galaktyk

Photo credit: American Institute of Physics, Emilio Segrè Visual Archives

Co więcej, na niebie jest pełno innych mgławic spiralnych, których jasność obserwowana wydaje się mniejsza, a rozmiary kątowe mniejsze niż rozmiary Andromedy. Jeżeli są podobne do Andromedy, to muszą znajdować się jeszcze dalej. To był kluczowy moment w naszym rozumieniu kosmosu. Hubble pokazał, że Mgławica Andromedy, a wraz z nią inne mgławice spiralne, mają mniej więcej takie same rozmiary jak cała Droga Mleczna, i że znajdują się w niewiarygodnie dużej odległości od nas. Hipoteza Kanta, zgodnie z którą mgławice spiralne to „wyspowe wszechświaty", tak duże jak sama Droga Mleczna, okazała się słuszna. Granice znanego Wszechświata nagle wykonały dramatyczny krok na zewnątrz.

Dwadzieścia lat później okazało się, że istnieje kilka rodzajów cefeid. Gdy wszystko zostało wyjaśnione, okazało się, że oszacowanie Hubble'a znacząco zaniża odległość Mgławicy Andromedy. Nasze obecne oszacowanie wynosi 2,5 miliona lat świetlnych. Co więcej, nowoczesne teleskopy, wyposażone w cyfrowe kamery (zamiast klisz fotograficznych), pokazują słabiej widoczne, zewnętrzne obszary Andromedy, których szerokość kątowa na niebie wynosi około 3°, z czego wynika, że średnica Galaktyki Andromedy (teraz nazywamy ją oczywiście galaktyką, a nie mgławicą) wynosi około 130 tysięcy lat świetlnych, nieco więcej niż średnica Drogi Mlecznej. Biorąc pod uwagę wszystkie te nowe dane, oszacowanie Hubble'a było w przybliżeniu poprawne, a jego wniosek, że Andromeda jest galaktyką — podobnie jak Droga Mleczna — było słuszne. Nawet pierwotne, bardzo przybliżone oszacowanie było wystarczające, aby odpowiedzieć na pytanie, które było tematem debaty Shapleya i Curtisa. Shapley był w błędzie, a Curtis miał rację.

Andromeda jest najbliższą dużą galaktyką. Zdjęcia wykonane przez Hubble'a za pomocą teleskopu na Mount Wilson pokazują, że na niebie jest pełno galaktyk. Andromeda jest rzeczywiście galaktyką spiralną, ale jej ramiona są niewyraźne i trudne do rozróżnienia, częściowo dlatego, że

widzimy je niemal idealnie z boku. Inne galaktyki widzimy pod innymi kątami, dzięki czemu możemy obserwować wyraźnie widoczne i spójne ramiona.

Spójrzmy ponownie na galaktykę Wiatraczek (il. 13.1). Obserwujemy tę galaktykę niemal idealnie z góry, dzięki czemu jej ramiona są doskonale widoczne. Galaktyka Wiatraczek ma te same podstawowe cechy jak Droga Mleczna, łącznie z centralnym zgrubieniem (nieco mniejszym od zgrubienia Drogi Mlecznej) oraz trzema ramionami wychodzącymi ze środka. Spiralne ramiona galaktyki Wiatraczek są całkiem niebieskie, co oznacza, że zawierają znaczną liczbę gorących, a zatem młodych, masywnych gwiazd. A to z kolei oznacza, że formowanie gwiazd cały czas trwa w spiralnych ramionach, podobnie jak w ramionach Drogi Mlecznej. Widoczne są także cienkie, ciemne „żyły" wzdłuż spiralnych ramion; są to obłoki pyłu, które znajdują się głównie w dysku i w ramionach galaktyki, podobnie jak w Drodze Mlecznej. Centralne zgrubienie jest żółtawe, co oznacza, że temperatura jego gwiazd jest niższa niż w ramionach, podobnie jak w Drodze Mlecznej. Młode, gorące gwiazdy, widoczne w ramionach, po prostu nie występują w zgrubieniu. Jest to ogólna tendencja, widoczna w większości galaktyk, łącznie z Drogą Mleczną i Andromedą: młodsze gwiazdy i aktywne powstawanie nowych gwiazd są widoczne w dysku i w ramionach; starsze gwiazdy są w zgrubieniu.

Zdjęcie galaktyki Wiatraczek jest całe pokryte punktami światła. Nie są to gwiazdy należące do galaktyki Wiatraczek, ponieważ z tej odległości (20 milionów lat świetlnych) pojedyncze gwiazdy byłyby znacznie słabsze. Są to raczej gwiazdy naszej własnej Galaktyki, Drogi Mlecznej, odległe zapewne o kilka tysięcy lat świetlnych, które znajdują się na linii obserwacji, podobnie jak krople deszczu na przedniej szybie samochodu. To ponownie przypomina nam, że gdy patrzymy w niebo, widzimy je tak, jakby było zrzutowane na dwuwymiarową powierzchnię; bez percepcji głębi nie wiemy, które obiekty są blisko, a które daleko. I rzeczywiście, niektóre słabo widoczne obiekty na obrzeżach tej fotografii to są inne galaktyki tworzące tło, odległe nie o miliony, lecz o miliardy lat świetlnych. Sama galaktyka Wiatraczek zajmuje około połowy stopnia na niebie; przy odległości 20 milionów lat świetlnych daje to średnicę około 170 tysięcy lat świetlnych, około dwóch razy więcej niż średnica Drogi Mlecznej.

Galaktyka na ilustracji 13.4, zwana Sombrero, ma ogromne zgrubienie (znacznie większe niż zgrubienie Drogi Mlecznej), które całkowicie zdominowało jej obraz. Wygląda jak rondo bardzo szerokiego kapelusza. Galaktyka jest ustawiona pod takim kątem względem nas, że widzimy jej bardzo cienki dysk niemal całkowicie z boku, natomiast bardzo słabo widoczna jest struktura spiralna. Widok z boku pozwala zobaczyć skutki obecności pyłu, który leży w płaszczyźnie dysku i tworzy piękne ciemne linie („frędzle" kapelusza), podobnie jak w naszej Galaktyce.

Nie wszystkie galaktyki mają dysk. Niektóre składają się z samego zgrubienia zdominowanego przez stare gwiazdy, z niewielką ilością gazu i pyłu. Hubble nazwał je galaktykami eliptycznymi.

Ilustracja 13.5 pokazuje gromadę galaktyk w konstelacji Perseusza, w której setki eliptycznych galaktyk skupiły się w obszarze przestrzeni o średnicy

około miliona lat świetlnych. Niemal wszystkie galaktyki w tym obszarze są eliptyczne. Na dodatek widzimy wiele gwiazd na pierwszym planie, ponieważ gromada w Perseuszu leży za strefą obfitującą w gwiazdy naszej Galaktyki.

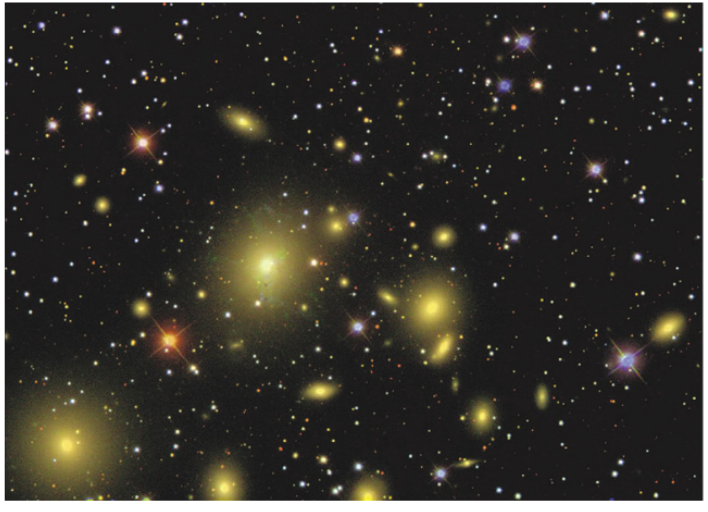
Większość jasnych galaktyk to albo galaktyki spiralne, albo eliptyczne, ale niektóre galaktyki nie pasują do żadnej z tych kategorii; nazywamy je po prostu galaktykami nieregularnymi, ze względu na ich nieregularny kształt. Wielki Obłok Magellana, mała (o średnicy 14 tysięcy lat świetlnych), satelitarna galaktyka, która krąży wokół Drogi Mlecznej w odległości około 160 tysięcy lat świetlnych, należy do tej kategorii. Jest widoczna przy lewej krawędzi ilustracji 12.1, obok kopuły obserwatorium. Leży tak blisko nas, że jest wyraźnie widoczna gołym okiem.

Odległość między Drogą Mleczną i Andromedą — 2,5 miliona lat świetlnych — jest mniej więcej dwadzieścia pięć razy większa niż rozmiary samych galaktyk. Galaktyki są oddalone na odległość znacznie przewyższającą ich rozmiary, co oznacza, że większość objętości Wszechświata stanowi przestrzeń międzygalaktyczna — pusta przestrzeń między poszczególnymi galaktykami. W rozdziale 12 przekonaliśmy się, że odległość od Słońca do najbliższej gwiazdy jest równa około 30 milionów średnic Słońca, natomiast odległość do najbliższej dużej galaktyki to tylko 25 średnic Drogi Mlecznej. Nawet jeżeli oswoisz się z rozmiarami pojedynczych gwiazd, odległości między gwiazdami są trudne do pojęcia. Ale jeżeli oswoisz się z rozmiarami pojedynczych galaktyk, odległości między nimi nie są wiele większe. Biorąc pod uwagę, że galaktyki leżą całkiem blisko względem siebie w porównaniu z ich własnymi rozmiarami, nie powinno nas dziwić, że często się zderzają.



ILUSTRACJA 13.4. Galaktyka Sombrero, spiralna galaktyka z wielkim zgrubieniem widocznym z boku

Photo credit: NASA oraz Hubble Heritage Team (AURA/STScI), Kosmiczny Teleskop Hubble'a, ACS STScI-03-28



ILUSTRACJA 13.5. Centrum gromady galaktyk w konstelacji Perseusza sfotografowane w ramach Sloan Digital Sky Survey

Photo credit: Sloan Digital Sky Survey, Robert Lupton

Galaktyka Kijanka (il. 13.6), około 400 milionów lat świetlnych od Ziemi, stanowi rezultat zderzenia dużej i małej spirali. Mała, poważnie zniekształcona, jest widoczna w ramionach dużej w lewym górnym rogu. Ich grawitacyjne oddziaływanie spowodowało, że jedno ze spiralnych ramion dużej galaktyki zostało wyciągnięte i tworzy obecnie długi na około 300 tysięcy lat świetlnych ogon, obsypany przez gorące, niebieskie gwiazdy. Środek większej galaktyki jest mocno zapylony, o czym świadczą widoczne ciemne linie pyłowe. Droga Mleczna i Andromeda spadają na siebie pod wpływem wzajemnego przyciągania grawitacyjnego. Gdy za około 4 miliardów lat dojdzie do ich kolizji, grawitacyjne siły pływowe będą z nich wyciągać podobne strumienie gwiazd jak te, które widzimy w galaktyce Kijanka.

Astronomowie od dziesiątków lat spierają się o to, co się dzieje w czasie takich zderzeń galaktyk. Czy po kilkuset milionach lat przekształcą się w galaktyki eliptyczne? Przy tej okazji pojawia się także podstawowe pytanie, jak w ogóle powstawały galaktyki. Gwiazdy w galaktykach eliptycznych są często starsze niż w spiralnych, co sugeruje, że galaktyki eliptyczne powstawały wcześniej w historii Wszechświata. Zgrubienia w galaktykach eliptycznych mają podobne cechy jak w spiralnych, co sugeruje, że powstawały w podobny sposób. Gaz, który opada na ukształtowaną galaktykę eliptyczną, może się ochłodzić, zanim zaczną się w nim tworzyć gwiazdy. Schłodzony gaz ma mniejszą energię, lecz jego moment pędu się nie zmienia, co może prowadzić do powstania cienkiego, wirującego dysku. W wyniku takiego procesu może powstać spiralna galaktyka z eliptycznym zgrubieniem. Szczegóły tego procesu są nadal niezbyt dobrze wyjaśnione i stanowią przedmiot gorących dyskusji.

Na ilustracji 13.6 jest coś więcej niż tylko galaktyka Kijanka. Jeżeli przyjrzysz się uważnie, zobaczysz wiele mniejszych galaktyk. Są to pełnowymiarowe galaktyki, ale bardziej odległe (dlatego na zdjęciu są mniejsze i słabsze). Niektóre z nich leżą miliardy lat świetlnych od nas. Ich światło potrzebowało miliardów lat, aby do nas dotrzeć, więc nie widzimy ich

takimi, jakie są dzisiaj, lecz takimi, jakie były, gdy Wszechświat był znacznie młodszy. Teleskopy są wehikułami czasu: pokazują odległą przeszłość i pozwalają nam badać procesy ewolucji galaktyk w kosmicznej skali czasu. Każdą konkretną galaktykę widzimy oczywiście w jednej konkretnej epoce jej życia, lecz porównując właściwości odległych galaktyk z tymi, które widzimy bliżej nas, możemy obserwować, jak populacja galaktyk zmieniała się w ciągu miliardów lat i poszukiwać odpowiedzi na pytanie, kiedy galaktyki powstały, dlaczego niektóre z nich są spiralne, a niektóre eliptyczne.



ILUSTRACJA 13.6. Galaktyka Kijanka, sfotografowana przez teleskop Hubble'a. Są to w rzeczywistości dwie galaktyki, które się połączyły. Widoczny jest proces wyrzucania

długiego ogona. Na zdjęciu zauważalnych jest także wiele słabszych, bardziej odległych galaktyk

Photo credit: ACS science and Engineering Team, NASA

Dzięki bardzo długiemu czasowi naświetlania na zdjęciach wykonanych przez Kosmiczny teleskop Hubble'a widoczne są tysiące słabych, odległych galaktyk w obszarze nieba obejmującym zaledwie kilka minut kątowych (zob. il. 7.7). Oznacza to, że w widzialnym Wszechświecie istnieje około 100 miliardów galaktyk. Każdy z tych ledwo widocznych punkcików to jest cała galaktyka, tak duża jak Droga Mleczna zawierająca ponad 100 miliardów gwiazd. Skoro każda z 10^{11} galaktyk zawiera 10^{11} gwiazd, to w widzialnym Wszechświecie istnieje około 10^{22} gwiazd — prawdziwie oszałamiająca liczba. Co rozumiemy przez pojęcie „widzialny Wszechświat"? Jak powstały te wszystkie galaktyki? Aby odpowiedzieć na te i podobne pytania, musimy najpierw zrozumieć, jak ewoluował sam Wszechświat. Tym tematem zajmiemy się w kolejnym rozdziale.

14 – Ekspansja Wszechświata

Michael A. Strauss

W astronomii istnieją dwie podstawowe strategie zgłębiania natury ciał niebieskich. Jedna z nich polega na wykonywaniu zdjęć, a następnie mierzeniu ich rozmiarów[2] i obserwowanej jasności. Druga metoda polega na wykonywaniu pomiarów widm. Widzieliśmy, że widma gwiazd pozwalają wyciągać wnioski na temat ich temperatury powierzchniowej oraz obecności pierwiastków w ich atmosferze. Na tej podstawie, a także dzięki zrozumieniu diagramu HR, mogliśmy określać ich rozmiary, masę oraz etapy ewolucji.

Czego mogą nas na temat fizycznej struktury galaktyk nauczyć ich widma? Astronomowie zaczęli mierzyć widma galaktyk około stu lat temu, około roku 1915. Galaktyki są słabe, ówczesne teleskopy były mniejsze, a przyrządy znaczne mniej czułe niż te, którymi dysponujemy obecnie. Pomiar widma galaktyki wymaga wielogodzinnego naświetlania, ale już na pierwszych widmach widoczne były takie same linie absorpcyjne jak te, które widzimy w gwiazdach (w szczególności w gwiazdach typu G i K), co natychmiast prowadziło do wniosku, że galaktyki są zbudowane z gwiazd. Dziesięć lat później Edwin Hubble doszedł do tego samego wniosku, gdy zdołał rozdzielić obrazy poszczególnych gwiazd na fotograficznych zdjęciach Mgławicy Andromedy (jak opisaliśmy w rozdziale 13). Widma galaktyk i widma gwiazd były uderzająco podobne dla astronomów obeznanych z badaniami widm, ale szybko okazało się, że jest między nimi jedna istotna różnica. Linie absorpcyjne galaktyk pochodzące od takich pierwiastków, jak wapń, magnez i sód, miały nieco inną długość fali niż linie absorpcyjne gwiazd. Zazwyczaj wszystkie linie widmowe pochodzące od konkretnej galaktyki były jednakowo

przesunięte w kierunku czerwonego końca widma. Nazywamy to zjawisko przesunięciem ku czerwieni (ang. *redshift*).

Aby zrozumieć, na czym polega przesunięcie ku czerwieni, trzeba stanąć na ruchliwej ulicy i posłuchać przejeżdżającego motocykla. Gdy motocykl się zbliża, słychać wysoki ton silnika. W momencie, gdy cię mija i zaczyna się oddalać, wysokość dźwięku zmniejsza się zauważalnie. Wszystko razem brzmi trochę jak „niiiijaoooouuuu!".

Dźwięk przejeżdżającego motocykla jest falą ciśnieniową rozchodzącą się dookoła w postaci ciągu zgęszczeń powietrza. Fala dźwiękowa, podobnie jak fala świetlna, ma pewną częstotliwość i odpowiadającą jej długość fali. Im większa częstotliwość (i mniejsza długość fali), tym wyższy dźwięk słyszy twoje ucho. Gdy nadjeżdżający motocykl emituje ciąg grzbietów (maksimów) fali, przy każdym kolejnym maksimum motocykl znajduje się trochę bliżej ciebie. W rezultacie kolejne maksima są nieco bliżej jedno obok drugiego — do twojego ucha dociera fala o mniejszej długości, czyli wyższej częstotliwości. Gdy motocykl się oddala, kolejne maksima są nieco dalej od siebie — do twojego ucha dociera fala o większej długości, czyli niższej częstotliwości. Ten efekt, po raz pierwszy opisany w 1842 roku przez austriackiego fizyka, Christiana Dopplera, działa zarówno dla fal dźwiękowych, jak i świetlnych: ruch odległej gwiazdy lub galaktyki odciśnie się jako systematyczne przesunięcie długości fali w widmie. Przesunięcia widma galaktyki ku czerwieni interpretujemy jako rezultat efektu Dopplera, a zatem jako konsekwencje oddalania się galaktyki. Względna zmiana długości fali emitowanej przez obiekt poruszający się z określoną prędkością jest w przybliżeniu równa prędkości obiektu, podzielonej przez prędkość dźwięku (w przypadku fal dźwiękowych) lub przez prędkość światła (jeżeli obserwujemy światło jakiegoś obiektu). Tu, na Ziemi, prędkość dźwięku w powietrzu wynosi około 1200 kilometrów na godzinę, więc szybki motocykl może spokojnie się poruszać z prędkością równą jednej dziesiątej prędkości dźwięku. Odpowiadająca tej prędkości zmiana wysokości dźwięku, gdy motocykl cię mija (od zbliżania z prędkością 10% prędkości dźwięku do oddalania z prędkością 10% prędkości dźwięku) wynosi około 20% — jest łatwo słyszalna, w terminologii muzycznej odpowiada tercji małej.

Długość fali świetlnej jest związana z kolorem, więc oddalający się obiekt będzie bardziej czerwony, gdyż jego światło ulega przesunięciu ku czerwieni. Efekt będzie widoczny gołym okiem tylko w przypadku prędkości, które stanowią znaczący ułamek prędkości światła. Motocykl porusza się z maleńkim ułamkiem prędkości światła, dlatego nie widzisz, że jego kolor zmienia się z niebieskiego na czerwony, gdy cię mija. Ani gwiazdy, ani galaktyki nie mijają nas na rogu ulicy, ale rejestrujemy ich widma, które mają pewne szczególne cechy — linie absorpcyjne odpowiadające pierwiastkom chemicznym. Długości fali dla tych linii znamy bardzo dokładnie dzięki laboratoryjnym pomiarom na Ziemi. Możemy zmierzyć długości fali tych samych linii emitowanych przez gwiazdę lub galaktykę; różnica między długościami fal dla linii zmierzonych na Ziemi i linii obserwowanych w

widmie gwiazdy lub galaktyki, zinterpretowana jako przesunięcie Dopplera, mówi nam, jak szybko dana gwiazda lub galaktyka porusza się względem nas.

W 1915 roku Vesto Slipher, pracujący w Lowell Observatory (tam, gdzie później odkryto Plutona), zmierzył przesunięcia Dopplera dla piętnastu galaktyk. Andromeda i dwie inne galaktyki miały przesunięcia ku fioletowi, co oznacza, że te trzy galaktyki zbliżają się do nas, lecz wszystkie pozostałe galaktyki miały przesunięcia ku czerwieni, czyli oddalają się od nas. Definiujemy przesunięcie ku czerwieni jako $z = (\lambda_{obs} - \lambda_{lab})/\lambda_{lab}$, gdzie λ_{lab} jest równe długości fali linii emisyjnej (lub absorpcyjnej) danego pierwiastka zmierzonej na Ziemi, natomiast λ_{obs} jest równe długości fali linii emisyjnej (lub absorpcyjnej) tego samego pierwiastka obserwowanej w widmie galaktyki. Przesunięcie ku czerwieni pobliskiej galaktyki jest związane z jej prędkością oddalania według równania: $z \approx v/c$, więc galaktyka oddalająca się od nas z prędkością równą 1% prędkości światła będzie miała przesunięcie ku czerwieni $z = 0{,}01$, a długości fali jej linii widmowych będą przesunięte ku większym wartościom o 1%. Społeczność astronomów zmierzyła już widma ponad dwóch milionów galaktyk; poza kilkoma wyjątkami, takimi jak Andromeda, wszystkie te widma mają przesunięcie ku czerwieni. Wynika stąd wniosek, że niemal wszystkie galaktyki we Wszechświecie oddalają się od Drogi Mlecznej. Widziałem kiedyś ilustrację szalonego naukowca machającego rękami nad okularem teleskopu i krzyczącego: „Galaktyki uciekają, ponieważ nas nienawidzą!”. Nie jest to poprawne wyjaśnienie, lecz godne uwagi jest spostrzeżenie, że skoro oddalają się od nas, to znaczy, że znajdujemy się w jakimś szczególnym położeniu — w centrum ruchu wszystkich galaktyk. Co tu się dzieje? Odpowiedź na to pytanie znalazł ponownie Edwin Hubble. Na przełomie lat dwudziestych i trzydziestych XX wieku Hubble wykonał kluczowe pomiary, które doprowadziły do współczesnego zrozumienia tych przesunięć ku czerwieni.

Wykonawszy pomiar odległości Mgławicy Andromedy według cefeid (gwiazd zmiennych), Hubble kontynuował swoje obserwacje, prowadząc pomiary odległości innych galaktyk wieloma różnymi metodami. Dla coraz dalej położonych galaktyk pomiary stają się coraz bardziej skomplikowane, ponieważ coraz trudniej jest rozróżnić pojedyncze gwiazdy w galaktyce. Według dzisiejszych standardów jego pomiary były mało dokładne, lecz pod koniec lat dwudziestych dysponował pomiarami odległości niewielkiej liczby galaktyk, dla których zmierzone były także widma (przez Vesto Sliphera oraz przez Miltona Humasona, asystenta Hubble’a), a zatem przesunięcia ku czerwieni oraz prędkości. Następnie Hubble sporządził prosty wykres, porównując odległości galaktyk z ich prędkościami, i zobaczył prostą zależność: im większa odległość, tym większa prędkość. Mimo znacznych błędów pomiarowych Hubble był w stanie wyciągnąć wniosek, że prędkość v jest proporcjonalna do odległości d:

$$v = H_0 d.$$

Powyższa zależność jest znana jako prawo Hubble’a, a stała proporcjonalności H_0 („H zero”) została na jego cześć nazwana stałą Hubble’a. Stała Hubble’a jest

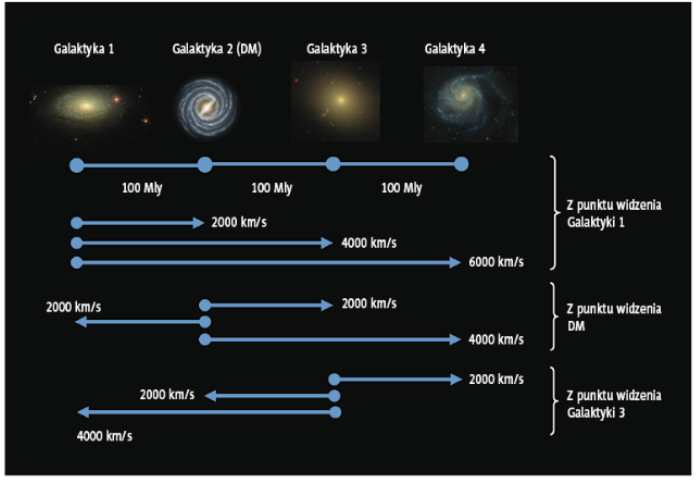
rzeczywiście stała w całej przestrzeni — w całym Wszechświecie — w dowolnym momencie kosmicznego czasu, lecz zmienia się z czasem. Wielkość oznaczona symbolem H_0 odnosi się do obecnej wartości stałej Hubble'a.

Patrząc z dzisiejszej perspektywy, to godne uwagi, że Hubble potrafił wywnioskować proporcjonalność między przesunięciem ku czerwieni i odległością, biorąc pod uwagę raczej słabą jakość jego danych (jak pamiętamy, jego pomiar odległości do galaktyki Andromedy był za mały o czynnik 2,5). Od 1929 roku teleskopy i techniki pomiarowe zostały znacznie ulepszone. W istocie, jednym z kluczowych zadań Kosmicznego Teleskopu Hubble'a były dokładne pomiary odległości galaktyk, między innymi przy wykorzystaniu cefeid, podobnie jak to zrobił sam Hubble. Te pomiary wykazały, że Hubble miał rację — przesunięcia ku czerwieni i odległości galaktyk są rzeczywiście dokładnie proporcjonalne. Często się zdarza, że przełomowe odkrycia są dokonywane na podstawie słabych danych uzyskanych na granicy możliwości aktualnie dostępnej technologii. Pierwszy wykres Hubble'a obejmował tylko galaktyki o prędkości do około 1000 km/s, co odpowiada (współczesnym) odległościom do około 50 milionów lat świetlnych. Do 1931 roku Hubble i jego asystent, Milton Humason, rozszerzyli wykres o galaktyki oddalające się z prędkością do 20 000 km/s. Te wyniki definitywnie rozstrzygnęły kwestię.

Czy rzeczywiście jest prawdą, że galaktyka Droga Mleczna znajduje się w jakimś wyjątkowym położeniu we Wszechświecie — w punkcie, od którego oddalają się wszystkie inne galaktyki? Taka koncepcja byłaby sprzeczna z zasadą, którą już kilkakrotnie napotkaliśmy, zwykle określaną jako zasada kopernikańska, zgodnie z którą Ziemia nie znajduje się w szczególnym położeniu we Wszechświecie. Ptolemeusz i inni starożytni astronomowie umieścili Ziemię w centrum Wszechświata, lecz Kopernik wykazał, że Ziemia krąży wokół Słońca. Następnie przekonaliśmy się, że Słońce jest zwykłą gwiazdą ciągu głównego. Początkowo sądzono (za Kapteynem), że Słońce zajmuje szczególne miejsce w pobliżu centrum Drogi Mlecznej, lecz bardziej dokładne obserwacje Shapleya pozwoliły stwierdzić, że w rzeczywistości Słońce leży w połowie drogi od centrum do granic Galaktyki. Na pierwszy rzut oka może się wydawać, że pomiary przesunięć ku czerwieni wskazują, iż Droga Mleczna zajmuje szczególne miejsce względem innych galaktyk — w środku ekspansji Wszechświata. Ale jednak tak nie jest.

Rozważmy cztery galaktyki jednakowo odległe, ułożone wzdłuż linii: Galaktyka 1 jest po lewej, następnie w odległości 100 milionów lat świetlnych od niej leży Droga Mleczna; Galaktyka 3 leży 100 milionów lat świetlnych na prawo od Drogi Mlecznej, a Galaktyka 4 kolejne 100 milionów lat świetlnych dalej (czyli 300 milionów na prawo od Galaktyki 1). Prawo Hubble'a mówi, że z punktu widzenia Galaktyki 1 Droga Mleczna oddala się z prędkością około 2000 km/s (pierwszy zestaw strzałek na il. 14.1). Galaktyka 3 oddala się od Galaktyki 1 z prędkością 4000 km/s — dwukrotnie szybciej, a Galaktyka 4, położona trzykrotnie dalej, oddala się od Galaktyki 1 z prędkością 6000 km/s. A jak to wygląda z naszego punktu widzenia, z Drogi Mlecznej? Ilustruje to drugi zestaw strzałek. Oddalamy się od Galaktyki 1 z prędkością 2000 km/s, ale my mierzymy prędkości w naszym własnym układzie odniesienia, więc

widzimy Galaktykę 1 oddalającą się od nas w lewo, z prędkością 2000 km/s. Widzimy Galaktykę 3 oddalającą się od nas z prędkością 2000 km/s, w przeciwnym kierunku — w prawo. Te dwie galaktyki są jednakowo oddalone od nas i oddalają się od nas z jednakową prędkością. Galaktyka 4 oddala się od nas ze względną prędkością 4000 km/s. Jest dwukrotnie dalej od nas i oddala się od nas z dwukrotnie większą prędkością. Widzimy, że wszystkie galaktyki oddalają się od nas. Im dalej są położone, tym szybciej się oddalają — nasze obserwacje także pasują do prawa Hubble'a.



ILUSTRACJA 14.1. Galaktyki na rozszerzającej się linii ilustrujące, że żadna galaktyka nie znajduje się w centrum rozszerzającego się Wszechświata. Cztery galaktyki są ułożone wzdłuż górnej linii; druga galaktyka reprezentuje Drogę Mleczną (DM). Każda para jest oddalona o 100 milionów lat świetlnych (Mly)[3]. Dzięki prawu Hubble'a galaktyki oddalają się od siebie w miarę, jak linia się rozszerza; pierwszy zestaw strzałek pokazuje względne prędkości widziane z punktu widzenia Galaktyki 1. Ruchy są względne, więc astronom z Drogi Mlecznej myśli, że jest nieruchoma, a pozostałe trzy galaktyki oddalają się od niej z prędkościami proporcjonalnymi do odległości (drugi zestaw strzałek). Sytuacja wygląda tak samo z punktu widzenia Galaktyki 3. W rezultacie każdy obserwator (niezależnie od pozostałych) dochodzi do wniosku, że jest nieruchomy, a wszystkie galaktyki oddalają się od niego z prędkościami wynikającymi z prawa Hubble'a

Photo credit: Michael Strauss, Droga Mleczna (schematyczna, artystyczna koncepcja NASA); obrazy pozostałych galaktyk dzięki uprzejmości Sloan Digital Sky Survey i Roberta Luptona

A teraz popatrzmy z perspektywy kosmity mieszkającego na planecie w Galaktyce 3. W prawie Dopplera istotna jest tylko względna prędkość galaktyk. Z perspektywy Galaktyki 3 Droga Mleczna jest oddalona o 100 milionów lat świetlnych i oddala się (w lewo) z prędkością 2000 km/s. Galaktyka 4 jest oddalona (w przeciwnym kierunku) o 100 milionów lat świetlnych i oddala się (w przeciwnym kierunku) z prędkością 2000 km/s. Galaktyka 1 oddala się od kosmity ze względną prędkością 4000 km/s. Kosmita widzi, że wszystkie galaktyki oddalają się od niego, więc dochodzi do wniosku, że to on znajduje się w środku całego ula. Myśli, że jest nieruchomy, a wszystkie galaktyki oddalają się od niego, podobnie jak my doszliśmy przed chwilą do wniosku, że to my siedzimy nieruchomo w środku, a wszystkie galaktyki oddalają się od nas. Ostatecznie obie strony muszą dojść do wniosku, że prędkość jest

proporcjonalna do odległości i że żadna galaktyka nie znajduje się w wyróżnionym położeniu.

W rzeczywistości prawo Hubble'a mówi nam dwie rzeczy. Po pierwsze, odległość dowolnych dwóch galaktyk rośnie: wszystkie galaktyki oddalają się od siebie nawzajem. Hubble odkrył ekspansję Wszechświata — Wszechświat się rozszerza! Po drugie, żadna galaktyka nie leży w środku ekspansji. Mieszkając w jednej, konkretnej galaktyce, dochodzimy do wniosku, że wszystkie pozostałe galaktyki oddalają się od nas tak, jakby były koralikami przyczepionymi do rozciągliwej gumowej taśmy. Gdy taśma jest rozciągana, wszystkie koraliki oddalają się od siebie nawzajem. Aby ostatecznie dojść do wniosku, że nie istnieje środek ekspansji, potrzebujemy jeszcze jednej rzeczy: musimy wiedzieć, czy istnieje granica rozkładu galaktyk. Rich powróci do tego zagadnienia w rozdziale 22, gdzie będzie mowa o zastosowaniu Einsteinowskiej ogólnej teorii względności do kosmologii.

Średnica Drogi Mlecznej wynosi około 100 tysięcy lat świetlnych, lecz jest to tylko jedna ze stu miliardów (10^{11}) galaktyk w widzialnym Wszechświecie, a w każdej z nich jest około stu miliardów gwiazd. Andromeda, najbliższa duża galaktyka, jest oddalona o 2,5 miliona lat świetlnych od Drogi Mlecznej; inne galaktyki są znacznie dalej, a odległości między nimi mierzy się w miliardach lat świetlnych.

Edwin Hubble odkrył, że galaktyki oddalają się od siebie z prędkościami proporcjonalnymi do wzajemnych odległości. W przypadku dużej odległości prędkość może stanowić znaczący ułamek prędkości światła. Wynika stąd wniosek, że Wszechświat jako całość się rozszerza. Było to w istocie jedno z wielkich naukowych odkryć XX wieku, porównywalne z odkryciem struktury DNA i jego roli w przekazywaniu kodu genetycznego, lub też z odkrytymi przez Einsteina teoriami względności.

Prawo Hubble'a stanowi podstawę łatwej metody pomiaru odległości galaktyk. Pomiar przesunięcia ku czerwieni danej galaktyki (łatwy do wykonania, jeżeli potrafisz zarejestrować widmo jej promieniowania) pozwala bezpośrednio uzyskać oszacowanie odległości (trudne do wykonania innymi metodami), dzięki proporcjonalności przesunięcia ku czerwieni i odległości. Ta metoda jest prosta i skuteczna pod warunkiem, że znasz wartość stałej proporcjonalności H_0 łączącej przesunięcie ku czerwieni i odległość. Aby wyznaczyć jej wartość, musisz najpierw inną, niezależną metodą zmierzyć odległości wybranej próbki galaktyk.

Jak już widzieliśmy, pomiar odległości obiektu astronomicznego stanowi kluczowy element zrozumienia jego natury. Znając odległość, możemy określić wiele istotnych cech obiektu, łącznie z jego mocą i rozmiarami. Znaczna część historii astronomii dotyczy rozmaitych sprytnych metod mierzenia odległości. Pomiar AU (odległość Ziemi od Słońca) w jednostkach fizycznych (czyli w metrach) był jednym z kluczowych problemów naukowych w XVIII i XIX wieku, dopóki nie został skutecznie rozwiązany dzięki obserwacjom przejścia Wenus przed tarczą Słońca oraz dzięki obserwacjom Marsa na tle odległych gwiazd wykonanym z różnych miejsc na Ziemi (zob. rozdział 2). Zjawisko paralaksy umożliwiło wyznaczenie odległości Wenus i Marsa (dzięki

triangulacji), a następnie także wyznaczenie AU. Z kolei AU stanowi skalę odległości dla całego Układu Słonecznego, a także umożliwiło pomiary odległości pobliskich gwiazd, dzięki efektowi paralaksy związanemu z ruchem orbitalnym Ziemi wokół Słońca. Dla gwiazd, które są zbyt daleko, aby efekt paralaksy był mierzalny — powyżej kilkuset lat świetlnych[4] — stosujemy prawo odwrotnych kwadratów łączące moc (jasność absolutną) gwiazdy z jej jasnością obserwowaną. Im mniejsza jest obserwowana jasność obiektu o znanej jasności absolutnej, tym dalej jest on położony.

Trudna część zadania polega na wyznaczeniu mocy. Wspomnieliśmy już cefeidy, gwiazdy zmienne, które stanowią przykład świec standardowych. Są to obiekty, których moc można wyznaczyć inną metodą, co pozwala zastosować prawo odwrotnych kwadratów do wyznaczenia odległości. Dobra świeca standardowa musi

1) mieć dostatecznie dużą moc, aby była widoczna z dużej odległości;
2) być łatwa do zidentyfikowania i odróżnienia od innych obiektów;
3) mieć swoich przedstawicieli niedaleko nas, aby można skalibrować jej moc (metodą paralaksy lub jakąś inną metodą).

Cefeidy spełniają pierwsze dwa warunki. Są bardzo jasne, a zmienność ich jasności pozwala je łatwo identyfikować w polu widzenia pełnym innych gwiazd. Ale tylko nieliczne spośród nich znajdują się na tyle blisko nas, aby można precyzyjnie zmierzyć ich paralaksy, co doprowadziło do pojawienia się kontrowersji dotyczących ich prawdziwej mocy. W istocie błędny pomiar odległości do cefeid Henrietty Leavitt, wynikający z błędnej identyfikacji pobliskich odpowiedników, spowodował niedoszacowanie przez Hubble'a odległości Galaktyki Andromedy. Najbliższą cefeidą jest Polaris, Gwiazda Północna, leżąca w odległości około 400 lat świetlnych.

Widzieliśmy, że gwiazdy ciągu głównego wykazują bezpośrednią zależność temperatury i mocy. Jeżeli potrafimy zmierzyć temperaturę gwiazdy (na przykład na podstawie jej widma), możemy uzyskać dobre oszacowanie jej mocy; następnie mierząc jasność obserwowaną, dostajemy odległość. Ta wersja świecy standardowej została całkiem dobrze skalibrowana na podstawie pomiarów odległości pobliskich gwiazd metodą paralaksy, dzięki czemu może być użyta do bardziej odległych gwiazd, których odległość jest zbyt duża, aby ich paralaksa była mierzalna. Tylko bardzo jasne gwiazdy są widoczne z dużych odległości, ale bardzo jasne gwiazdy są także bardzo rzadko spotykane, a zatem niewiele z nich jest na tyle blisko, aby dało się zmierzyć ich paralaksy.

Użycie gwiazd ciągu głównego do zdefiniowania świec standardowych może być wykonane dla całej grupy gwiazd, a nie tylko dla pojedynczej gwiazdy. Na przykład wszystkie gwiazdy gromady kulistej są efektywnie w tej samej odległości od nas. Jeżeli zatem porównamy gwiazdy ciągu głównego w jakiejś gromadzie kulistej ze (skalibrowanymi) gwiazdami ciągu głównego niedaleko nas, to możemy bezpośrednio wyznaczyć odległość całej gromady. W ten sposób możemy wyznaczyć odległość rzadko spotykanej gwiazdy w

gromadzie kulistej, która nie ma odpowiedników na tyle blisko nas, aby dało się zmierzyć ich paralaksy.

Podobnie jak gwiazdy, galaktyki także mają znaczny rozrzut mocy. Dla galaktyk spiralnych istnieje zależność przypominająca ciąg główny — korelacja prędkości rotacji galaktyki (mierzalna dzięki efektowi Dopplera w widmie) oraz jej mocy. Możemy skalibrować tę relację rotacji i mocy dla pobliskich spiral, a następnie wykorzystać pomiary rotacji bardziej odległej spirali do oszacowania jej absolutnej jasności, zmierzyć jej jasność obserwowaną i wyznaczyć odległość.

Taka seria kroków — w której pomiar odległości jednego typu obiektu jest wykorzystany do wyznaczenia odległości innego jaśniejszego, ale rzadziej występującego obiektu, który z kolei może być wykorzystany do wyznaczenia odległości jeszcze bardziej oddalonych obiektów — jest znana pod nazwą kosmiczna drabina odległości. Gołym okiem widać, że jest to dość kulawa procedura; i rzeczywiście, wątpliwości kumulują się w miarę przechodzenia do coraz większych odległości. A skoro w ten sposób została wyznaczona stała Hubble'a, H_0, wiążąca przesunięcie ku czerwieni z odległością, to nic dziwnego, że nie uniknęliśmy pewnych kontrowersji.

Z prawa Hubble'a, $v = H_0 d$, wynika, że stała Hubble'a ma wymiar prędkości (prędkości ucieczki v, zwykle mierzonej w kilometrach na sekundę) podzielonej przez odległość d (mierzoną w megaparsekach, Mpc, czyli w milionach parseków). Wartość stałej Hubble'a, oszacowana przez Hubble'a, wynosi około 500 (km/s)/Mpc (jak widzieliśmy, jest zbyt duża, ze względu na niedoszacowaną odległość Galaktyki Andromedy, spowodowaną z kolei przez błędną kalibrację cefeid). Hubble zmarł w 1953 roku, wkrótce po tym, jak wielki, 200-calowy (5-metrowy) teleskop został zainstalowany w obserwatorium na Mount Palomar, niedaleko San Diego. Allan Sandage, jego były asystent, kontynuował program wyznaczania odległości galaktyk.

W ciągu kilkudziesięciu kolejnych lat Sandage i jego współpracownicy, korzystając z 200-calowego teleskopu Palomar oraz innych teleskopów, dokonali ogromnego postępu w naszym rozumieniu galaktyk. Na początku lat siedemdziesiątych Sandage miał w zasadzie tylko jednego poważnego rywala w dziedzinie pomiarów odległości galaktyk, a co za tym idzie, w wyznaczaniu stałej Hubble'a. Był to astronom z University of Texas, Gérard Henri de Vaucouleurs. W latach siedemdziesiątych dwie grupy astronomów — grupa Sandage'a i zespół de Vaucouleursa — niezależnie od siebie opublikowały monumentalne serie artykułów, w których przedstawiły swoje wersje „kroków prowadzących do stałej Hubble'a". Wynik Sandage'a wynosił około 50 (km/s)/Mpc (o pełny czynnik 10 mniej od oryginalnej wartości Hubble'a), natomiast według de Vaucouleursa stała Hubble'a wynosiła około 100 (km/s)/Mpc. Różnili się w wielu szczegółach na każdym stopniu kosmicznej drabiny odległości. Cała społeczność astronomów była żywotnie zainteresowana, ponieważ wartość stałej Hubble'a decyduje o skali naszego Wszechświata. Aby zmierzyć przesunięcie ku czerwieni galaktyki, wystarczy zarejestrować jej widmo. Aby wyznaczyć odległość galaktyki,wystarczy znać jej przesunięcie ku czerwieni oraz wartość stałej Hubble'a.

Na początku lat osiemdziesiątych wielu młodszych astronomów odważyło się włączyć do gry. Pojawiły się nowe świece standardowe i ulepszone techniki obserwacji. Kosmiczny Teleskop Hubble'a był po części zaprojektowany po to, aby rozstrzygnąć tę kwestię. Jego zdolność rozdzielcza (w połączeniu z wyeliminowanym wpływem interferencji atmosferycznych) umożliwiała identyfikację i dokładne pomiary właściwości cefeid w galaktykach odległych od 30 do 40 milionów lat świetlnych. Zespół Wendy Freedman (która przez wiele lat była dyrektorem Carnegie Observatories w Pasadenie, gdzie pracował Sandage) przeprowadził rozległą kampanię obserwacji Kosmicznym Teleskopem Hubble'a. W 2001 roku opublikowali oni wyniki swoich obserwacji wraz z wartością stałej Hubble'a, $H_0 = 72 \pm 8$ (km/s)/Mpc, niemal dokładnie w połowie drogi między wynikami Sandage'a i de Vaucouleursa. W tym samym 2001 roku Rich Gott i jego koledzy oszacowali wartość stałej Hubble'a, biorąc medianę wszystkich uprzednio opublikowanych wartości (uzyskanych różnymi metodami). Ich wartość wynosiła $H_0 = 67$ (km/s)/Mpc. Mediana (wartość środkowa) jest często zaskakująco dobrym indykatorem, ponieważ jest w mniejszym stopniu (niż wartość średnia) podatna na odchylenia wynikające ze znacząco zawyżonych lub znacząco zaniżonych wyników. Najlepsze dzisiejsze oszacowanie, ponad dziesięć lat później — wykorzystujące pomiary mikrofalowego promieniowania tła (CMB), wykonane przez satelitę Planck — wynosi 67 ± 1 (km/s)/Mpc. W rozdziale 23 opiszemy, w jaki sposób ta wartość została potwierdzona przez zespół Sloan Digital Sky Survey, który połączył rezultaty z supernowych, z grupowania galaktyk oraz z CMB, i otrzymał wynik $67{,}3 \pm 1{,}1$ (km/s)/Mpc.

Allan Sandage, jeden z gigantów astronomii, zmarł w 2010 roku, w wieku 84 lat. W swojej ostatniej publikacji w 2007 roku, stwierdził, że wartość stałej Hubble'a prawdopodobnie mieści się w zakresie od 53 do 70 (km/s)/Mpc, uznając tym samym obecnie obowiązującą wartość.

Gdy już ustaliliśmy wartość stałej Hubble'a, możemy wrócić do analizy i dyskusji na temat konsekwencji prawa Hubble'a oraz ekspansji Wszechświata.

Możemy wyobrażać sobie Wszechświat jako ogromny bochen chleba nadziewanego rodzynkami, który rośnie w piekarniku. Rodzynki to galaktyki, a ciasto to przestrzeń między nimi. Gdy chleb rośnie (czyli ciasto się rozszerza), każdy rodzynek oddala się od każdego innego rodzynka. Z punktu widzenia dowolnego rodzynka wszystkie inne rodzynki oddalają się od niego. W rezultacie każdy rodzynek (galaktyka) może (błędnie) dojść do wniosku, że znajduje się w centrum bochenka (Wszechświata). Co więcej, trzeci rodzynek, który jest dwukrotnie dalej od pierwszego rodzynka niż drugi rodzynek, oddala się dwukrotnie szybciej, ponieważ między nimi jest dwukrotnie więcej rozszerzającego się ciasta. Chleb z rodzynkami przestrzega prawa Hubble'a.

Ta analogia nie jest jednak doskonała. Nasz bochenek ma dobrze określony środek, który możemy zlokalizować, badając kształt skórki, prawdziwy Wszechświat wydaje się nieskończony (o tyle, o ile potrafimy to zmierzyć) i nie ma granicy, która pozwoliłaby zdefiniować środek. Do kwestii kształtu lub geometrii Wszechświata wrócimy w rozdziale 22.

Prawo Hubble'a mówi, że galaktyki oddalają się od siebie, co prowadzi do wniosku, że Wszechświat się rozszerza. Czy to oznacza, że pojedyncza galaktyka się rozszerza? Czy gwiazdy oddalają się od siebie nawzajem? Czy Układ Słoneczny się rozszerza? A Słońce? Nasze własne ciało? Ci z nas, którzy próbują stracić na wadze, być może odpowiedzą pozytywnie na ostatnie pytanie, ale w rzeczywistości ekspansja Wszechświata zachodzi dopiero w skali odległości między galaktykami. Galaktyki, podobnie jak rodzynki, same się nie rozszerzają. Rozszerza się przestrzeń między rodzynkami. Obiekty utrzymywane przez grawitację lub przez inne siły, łącznie z pojedynczymi galaktykami, pojedynczymi gwiazdami, planetami, a nawet nami, nie rozszerzają się. W istocie, nawet galaktyki Droga Mleczna i Andromeda, które są grawitacyjnie związane, zbliżają się do siebie, a nie oddalają. Galaktyka Andromedy jest jedną z nielicznych galaktyk, dla których obserwujemy przesunięcie ku fioletowi, a nie przesunięcie ku czerwieni.

Wspomnieliśmy już, że galaktyki Droga Mleczna i Andromeda zderzą się za jakieś 4 miliardy lat (zanim jeszcze nasze Słońce zużyje cały wodór w swoim rdzeniu i stanie się czerwonym olbrzymem). Odległości między pojedynczymi gwiazdami są jednak tak ogromne w porównaniu z rozmiarami samych gwiazd, że obie galaktyki przenikną przez siebie niemal bez zderzeń między gwiazdami. Hollywood raczej nie zrobi katastroficznego filmu pod tytułem *Galaxies in Collision...* a może jednak; to nie byłby pierwszy przypadek, gdy filmowcy przekręcają naukowe fakty, aby uatrakcyjnić fabułę i zwiększyć sprzedaż biletów!

Jeżeli Wszechświat się rozszerza, a przestrzeń między galaktykami się z czasem powiększa, to w przeszłości galaktyki musiały być bliżej. Rozważmy galaktykę, która leży w odległości d od nas i oddala się z prędkością daną przez prawo Hubble'a, $v = H_0 d$. Przyjmując z grubsza założenie, że ta prędkość jest stała w czasie, możemy zapytać, ile czasu ta galaktyka potrzebuje, aby pokonać odległość d? Równoważne pytanie brzmi: kiedy ta galaktyka była tu, gdzie my jesteśmy, obok nas? Jeżeli jakieś miasto jest oddalone o 500 kilometrów, a ktoś z jego mieszkańców jedzie do mnie w odwiedziny z prędkością 50 kilometrów na godzinę, to czas potrzebny na pokonanie tej odległości jest równy tejże odległości podzielonej przez prędkość: 500 km/(50 km/h) = 10 godzin. W naszym przypadku chcemy wiedzieć, jak dawno temu galaktyka była tu, gdzie my. Ten czas t (w przeszłości) jest równy odległości d, jaką galaktyka pokonała, podzielonej przez prędkość v (równą $H_0 d$, zgodnie z prawem Hubble'a):

$$t = d/v = d/(H_0 d) = 1/H_0.$$

To wygląda jak prosty wynik[5], i rzeczywiście jest prosty, ale ma ogromne znaczenie. Zwróć uwagę, że czas t nie zależy od odległości d. Oznacza to, że ten czas t jest taki sam dla dowolnej galaktyki. Wydaje się więc, że wszystkie galaktyki były razem w jednym miejscu w jednym czasie w przeszłości. Zanim zaczniemy głębiej analizować tę myśl, pamiętajmy, że to nadal nie oznacza, iż jesteśmy w centrum ekspansji, ponieważ takie samo rozumowanie

moglibyśmy przeprowadzić z punktu widzenia jakiejś innej galaktyki i otrzymalibyśmy taki sam rezultat. Doszliśmy do wniosku, że był taki czas we Wszechświecie, gdy cała materia Wszechświata była skompresowana w jednym miejscu. Wszystkie „rodzynki" były w jednym miejscu. Wiemy także, kiedy to było! Od owego momentu upłynął czas równy $1/H_0$. To kolejny powód, dla którego cała społeczność astronomów jest tak głęboko zainteresowana wartością stałej H_0. Stała Hubble'a decyduje o wieku naszego Wszechświata.

Policzmy. Najlepsza obecna wartość stałej Hubble'a, oszacowana na podstawie obserwacji wykonanych przez satelitę Planck, wynosi 67 (km/s)/Mpc, więc odwrotność $1/H_0$ daje (1/67) s·Mpc/km. Jeden megaparsek jest równy $3{,}085 \times 10^{19}$ kilometrów. Podstawiając te liczby do $1/H_0$, dostajemy $4{,}6 \times 10^{17}$ sekund. Po zamianie sekund na lata okazuje się, że wszystkie galaktyki były w jednym miejscu mniej więcej 14,6 miliarda lat temu.

Ten szczególny moment w życiu Wszechświata nazywamy Wielkim Wybuchem. Określenie „Wielki Wybuch" (ang. *Big Bang*) wymyślił Fred Hoyle pod koniec lat czterdziestych. Przez całe swoje życie, aż do grobowej deski, Hoyle był przekonany, że koncepcja Wielkiego Wybuchu jest błędna, lecz nazwa pozostała. W 1994 roku Carl Sagan, dziennikarz naukowy Timothy Ferris oraz prezenter telewizyjny Hugh Downs doszli do wniosku (podobnie jak Calvin i Hobbes, bohaterowie gazetowych komiksów, omawiający tę kwestię na il. 14.2), że tak ważne określenie dotyczące kluczowej koncepcji we współczesnej kosmologii, zasługuje na bardziej sugestywną nazwę niż „Wielki Wybuch". Ogłosili międzynarodowy konkurs, prosząc o alternatywne nazwy. Otrzymali ponad trzynaście tysięcy propozycji. Przeglądnąwszy wszystkie sugestie i rozważywszy wszystkie alternatywne propozycje, wycofali się całkowicie i uznali, że „Wielki Wybuch" jest jednak wystarczająco sugestywny.

Prawo Hubble'a doprowadziło nas do wniosku, że w pewnym określonym momencie, około 14,6 miliarda lat temu, cały Wszechświat był skupiony w jednym miejscu i od tej chwili Wszechświat się rozszerza. Nasze obliczenia były dość niedokładne, ponieważ założyliśmy, że wszystkie galaktyki poruszały się ze stałą prędkością, lecz współczesna wartość, oparta na bardziej wyrafinowanych obliczeniach, nie różni się znacznie od naszej — wynosi 13,8 miliarda lat. Czy to oszacowanie wieku Wszechświata (bo przecież w rzeczywistości to mamy na myśli) ma sens? Znamy wiek Układu Słonecznego na podstawie pomiarów promieniotwórczości księżycowych skał oraz meteorytów; wynosi około 4,6 miliarda lat. Ta sama skala czasu, aczkolwiek Słońce jest oczywiście młodsze od Wszechświata. Słońce i cały Układ Słoneczny został wzbogacony w ciężkie pierwiastki, które powstały we wcześniejszych supernowych, więc nie spodziewamy się, że Słońce jest jedną z pierwszych, najstarszych gwiazd. Opisaliśmy także, jak można wykorzystać położenie punktu wyjścia gromady kulistej z ciągu głównego na diagramie HR do oszacowania jej wieku: najstarsze gromady kuliste liczą sobie od 12 do 13 miliardów lat.

To absolutnie niesamowite, że trzy różne, całkowicie niezależne metody szacowania wieku Wszechświata (i najstarszych obiektów we Wszechświecie) dają tak spójne wyniki! Powinniśmy podziwiać, że te oszacowania tak dobrze zgadzają się ze sobą; to wielki triumf naszych fundamentalnych koncepcji na temat budowy Wszechświata. Skoro wszystkie one zgadzają się ze sobą (a o najstarszych znanych nam obiektach we Wszechświecie wiemy, że nie istnieją dłużej niż czas, który upłynął od Wielkiego Wybuchu), to możemy mieć pewność, że nasze podstawowe fizyczne idee są poprawne.

Wyobraźmy sobie teraz, jak Wszechświat wyglądał w przeszłości. Skoro Wszechświat się rozszerza, jego gęstość zmniejsza się z czasem. Określona ilość masy wraz z upływem czasu zajmuje coraz większą objętość, więc wcześniej gęstość była większa. Podobnie jak w gwiazdach zwykle jest tak, że im większa gęstość, tym wyższa temperatura, czyli w przeszłości Wszechświat był gorętszy niż obecnie (w rozdziale 15 wyjaśnimy, jak należy rozumieć pojęcie temperatury Wszechświata; okazuje się, że jest ono dobrze zdefiniowane). Rzeczywiście, stosując najprostsze ekstrapolacje, dochodzimy do wniosku, że był taki moment, około 13,8 miliarda lat temu, gdy cały obserwowalny Wszechświat był nieskończenie gorący i nieskończenie gęsty. Od tego czasu rozszerzał się i ochładzał. Nie potrafimy dojść dalej (wcześniej) niż 13,8 miliarda lat temu, więc to jest nasza definicja narodzin Wszechświata. ekspansja zaczęła się od Wielkiego Wybuchu i jest nadal obserwowana we Wszechświecie w postaci prawa Hubble'a.



ILUSTRACJA 14.2. „Horrendous Space Kablooie", kreskówka *Calvin and Hobbes*

Photo credit: CALVIN AND HOBBES © 1992 Watterson. Przedruk za zgodą UNIVERSAL UCLICK. Wszystkie prawa zastrzeżone

Wygląda na to, że w momencie Wielkiego Wybuchu Wszechświat był nieskończenie gorący i nieskończenie gęsty. Czy był także nieskończenie mały? I tu wkraczamy na niepewny grunt. Odpowiedź brzmi: raczej nie, a w każdym razie nie w takim sensie, w jakim zwykle używamy słowa „mały". Załóżmy, że dzisiaj Wszechświat jest nieskończenie duży. „Chwileczkę! — mógłbyś zaprotestować. — Wszędzie w tej książce piszecie, że widzialny Wszechświat jest skończony, a jego promień wynosi kilkadziesiąt miliardów lat świetlnych!" Rzeczywiście tak piszemy. Ale musimy odróżnić Wszechświat jako całość oraz Wszechświat widzialny (obserwowalny), czyli to, co widzimy

dzisiaj. Wszechświat, który widzimy dzisiaj, jest skończony. Wszechświat się rozszerza, a zatem jego gęstość maleje, ale jeżeli dzisiaj jest nieskończony, to rozszerzając się w przyszłości lub kurcząc się, jeżeli cofniemy się w przeszłość, nadal będzie lub był nieskończony. I tak byłoby cały czas aż do Wielkiego Wybuchu. To rozumowanie prowadzi do wniosku, że w Wielkim Wybuchu Wszechświat miał nieskończone rozmiary, był nieskończenie gęsty i nieskończenie gorący. Nie miał centrum i z pewnością nie miał granicy, poza którą ktoś mógłby spojrzeć i zobaczyć jakąś większą całość.

To brzmi jak kwestia semantyczna, ale w istocie jest to najprostszy sposób myślenia i zrozumienia wczesnego Wszechświata. To, co teraz robimy, to ubieranie w odpowiednie słowa rezultatów i rozwiązań równań ogólnej teorii względności. Wyjaśnimy to bardziej szczegółowo w dalszych rozdziałach. Wielki Wybuch nie był eksplozją — jak niekiedy jest błędnie przedstawiany — czegoś bardzo małego i bardzo gęstego, co następnie rozszerza się w pustej przestrzeni. To nie była bomba. Wszechświat nie ma granicy, więc nie ma pustej przestrzeni „na zewnątrz", w której miałby się rozszerzać. To sama przestrzeń się rozszerza.

Jeżeli nie ma czegoś takiego jak zewnętrzna granica Wszechświata, to czy możemy zadać pytanie: co było przed Wielkim Wybuchem? Niestety, nasze równania na to nie pozwalają. Tak, to jest rozsądne pytanie, ale nie, ogólna teoria względności nie daje na nie odpowiedzi. Równania ogólnej teorii względności przewidują nieskończoną gęstość w momencie Wielkiego Wybuchu, a w nauce, gdy równanie daje nieskończony wynik, jest to sygnał, że twoja teoria jest niekompletna — teoria nie obejmuje całego problemu.

Równania ogólnej teorii względności załamują się w momencie Wielkiego Wybuchu, więc nie możemy ich rozciągnąć na czas przed Wielkim Wybuchem. „Co się działo przed Wielkim Wybuchem?" — kosmolodzy często słyszą to pytanie i — niestety — często odpowiadają, że pytanie nie ma sensu, co sugeruje, że osoba zadająca pytanie jest niemądra. Pytanie nie jest ani niemądre, ani głupie — załamanie równań w Wielkim Wybuchu to jest problem dla teorii, a nie dla zadających pytania! Wrócimy do tych pytań w rozdziałach 22 i 23, gdzie będziemy omawiać kwestie kształtu lub raczej geometrii Wszechświata i będziemy się zastanawiać, co mogło zainicjować Wielki Wybuch.

Tak czy owak, nie znając odpowiedzi na to pytanie, kosmolodzy uważają, że czas zaczął się w Wielkim Wybuchu. Jest to nasz własny mit stworzenia, aczkolwiek, jak widzieliśmy, wynika z bezpośrednich obserwacji Wszechświata oraz ze zrozumienia fizyki. Wszechświat ma nieskończone rozmiary, lecz ma skończony wiek. Skończony wiek w połączeniu ze skończoną wartością prędkości światła oznacza, że tylko pewną skończoną część Wszechświata możemy obserwować. Jako przykład rozważmy naszą dzisiejszą sytuację, 13,8 miliarda lat po Wielkim Wybuchu. Siedzimy w galaktyce, którą nazywamy Drogą Mleczną. Wszechświat wokół nas jest nieskończony, lecz nie widzimy go, ponieważ światło rozchodzi się ze skończoną prędkością. Światło pochodzące z najbardziej oddalonej od nas

widzialnej materii, które dopiero teraz do nas dociera, podróżowało w naszym kierunku przez 13,8 miliarda lat i zdołało pokonać odległość 13,8 miliarda lat świetlnych, przemierzając nieustannie rozszerzającą się przestrzeń między tą materią i nami. Ale my teraz widzimy tę materię taką, jaka była w przeszłości — i tam, gdzie wtedy była. A gdzie jest teraz? W międzyczasie ekspansja Wszechświata przeniosła tę materię (w międzyczasie uformowaną w galaktyki) na odległość 45 miliardów lat świetlnych od naszego obecnego położenia. Ta liczba reprezentuje dzisiejszą granicę obserwowalnego Wszechświata. Poza tymi galaktykami leżą inne, bardziej odległe od nas galaktyki, od których nigdy nie dotarły do nas żadne fotony. Jak zobaczymy w dalszych rozdziałach, przestrzeń między nimi i nami rozszerza się tak szybko, że światło od nich nie miało dość czasu, aby ją przebyć. Zatem poza granicą obserwowalnego Wszechświata jest więcej Wszechświata — w istocie nieskończenie wiele, jeżeli mamy wierzyć naszym aktualnym pomiarom geometrii widzialnego Wszechświata oraz naszym modelom kosmologicznym. Możesz uznać to za największą ekstrapolację współczesnej nauki: prowadzimy obserwacje w naszym skończonym, widzialnym Wszechświecie, którego aktualny promień wynosi „tylko” 45 miliardów lat świetlnych, i ekstrapolujemy do nieskończonego Wszechświata!

15 – Wczesny Wszechświat

Michael A. Strauss

Wczesny Wszechświat, tuż po Wielkim Wybuchu, był bardzo gorący i gęsty, ale rozszerzał się i ochładzał. Mamy równania, dzięki którym możemy wykonywać szczegółowe obliczenia stanu materii we wczesnym Wszechświecie. Jest to interesujący i płodny obszar dla fizyków, ponieważ dotyczy właściwości materii w ekstremalnie wysokiej temperaturze i przy ekstremalnie wysokiej gęstości. Co więcej, reakcje jądrowe we wczesnym Wszechświecie pozostawiły wyraźne ślady w postaci obserwowanego rozpowszechnienia pierwiastków chemicznych w dzisiejszym Wszechświecie. Przekonamy się, że przewidywania oraz wyniki obliczeń dotyczące rozpowszechnienia lekkich pierwiastków zgadzają się idealnie z obserwacjami, co upewnia nas, że dobrze rozumiemy, co się działo w pierwszych momentach po Wielkim Wybuchu. Zacznijmy opowieść od pierwszej sekundy po Wielkim Wybuchu. Wielki Wybuch był niesamowicie gorący, miał około 10^{10} K (10 miliardów kelwinów!) i potwornie gęsty, przynajmniej według ludzkich standardów — około czterystu pięćdziesięciu tysięcy razy gęstszy od wody. Nie istniały jeszcze galaktyki, gwiazdy ani planety. W rzeczy samej, było zbyt gorąco, aby mogły istnieć cząsteczki, atomy, a nawet jądra atomowe. Materia Wszechświata w owym momencie składała się z elektronów, pozytonów, protonów, neutronów, neutrin, no i oczywiście było wtedy mnóstwo promieniowania (czyli fotonów). A jeżeli ciemna materia składa się z jeszcze nieodkrytych cząstek elementarnych, jak obecnie sądzimy,

to spodziewamy się, że istniały w dużych ilościach także we wczesnym Wszechświecie.

Dwie i pół minuty później Wszechświat ochłodził się do temperatury „zaledwie" miliarda kelwinów. Fotony miały maksimum swojego widma (promieniowania ciała doskonale czarnego) w zakresie gamma. Miliard kelwinów to jest wystarczająco niska temperatura, aby mogły zachodzić reakcje, w których neutrony i protony łączyły się ze sobą. W Słońcu zachodzą reakcje, w wysokiej temperaturze i przy wysokiej gęstości, w których protony łączą się i tworzą jądra helu (zob. rozdział 7). W rdzeniach takich gwiazd jak Słońce zamiana 10% wodoru na hel trwa miliardy lat. Reakcje jądrowe we wczesnym Wszechświecie były znacznie szybsze, ponieważ istniały zarówno swobodne neutrony, jak i swobodne protony. Fuzja dwóch protonów wymaga wysokiej energii, ponieważ oba protony są dodatnio naładowane i odpychają się, co powoduje, że procesy fuzji proton–proton zachodzą rzadziej. Neutrony są elektrycznie neutralne (a więc nie są odpychane przez protony), więc procesy fuzji neutron–proton zachodzą częściej. Produkcja helu może się odbywać przez dodawanie neutronów do protonów, co pozwala pominąć pierwszy etap słonecznej fuzji (czyli zderzenia proton–proton).

Protony i neutrony mogą się wzajemnie zamieniać jeden w drugi. Połączenie neutronu i pozytonu może dać proton plus antyneutrino elektronowe i vice versa. Neutron plus neutrino elektronowe może dać proton plus elektron i vice versa. Neutron może się rozpaść na proton, elektron i antyneutrino. Przy 10 miliardach kelwinów (taka temperatura panuje w momencie, gdy mija pierwsza sekunda istnienia Wszechświata) te procesy są w równowadze. Neutron ma nieco większą masę od protonu, czyli do jego powstania potrzeba nieco więcej energii, więc w pierwszej sekundzie było nieco mniej neutronów niż protonów. Ale Wszechświat nadal się rozszerza i schładza, i stopniowo coraz więcej neutronów zamienia się w lżejsze protony. Gdy Wszechświat ochłodzi się do miliarda kelwinów, w równowadze będzie siedem protonów na jeden neutron. W temperaturze jednego miliarda kelwinów mniej energii termicznej jest do dyspozycji, aby nadrobić różnicę masy ($E = mc^2$) między protonem i neutronem, więc jest mniej neutronów niż protonów. W tym momencie Wszechświat ochłodził się na tyle, aby neutron i proton mogły się połączyć i utworzyć deuteron (jądro ciężkiego wodoru — deuteru), a deuteron nie rozpada się natychmiast na skutek zderzenia z kolejną cząstką. Deuteron może następnie brać udział w kolejnych reakcjach jądrowych, dodając kolejny neutron i kolejny proton, i tworząc jądro helu (dwa neutrony i dwa protony). Reakcje jądrowe zachodzą w kilku pierwszych minutach. W tym czasie niemal wszystkie neutrony zostały włączone do jąder helu, a Wszechświat schłodził i rozrzedził się na tyle, że reakcje się zakończyły.

Policzmy, ile helu powstało. W każdym jądrze helu są dwa neutrony. Przy proporcji jeden neutron na każde siedem protonów tym dwóm neutronom odpowiada czternaście protonów. Dwa spośród tych protonów są związane z dwoma neutronami, tworząc jądro helu, co pozostawia na wolności dwanaście protonów. Wynika stąd, że na każde jądro helu przypada dwanaście protonów

(które oczywiście są jądrami wodoru). Po kilku pierwszych minutach Wszechświat jest na tyle chłodny i rozrzedzony, że dalsze reakcje jądrowe nie zachodzą. W rezultacie w Wielkim Wybuchu powstaje znaczna liczba jąder helu oraz śladowe ilości deuteronów (jąder deuteru), jąder litu oraz berylu (który rozpada się na lit); cięższe pierwiastki nie powstają.

Tę analizę oraz obliczenia po raz pierwszy wykonali w latach czterdziestych XX wieku George Gamow oraz jego student, Ralph Alpher. Gamow nie mógł się oprzeć, aby nie dodać Hansa Bethego jako współautora ich słynnego artykułu (Alpher-Bethe-Gamow, czyli „α-β-γ") opisującego ich rezultaty. Proporcja jedno jądro helu na każde dwanaście jąder wodoru doskonale zgadza się z wynikami znacznie wcześniejszych obserwacji Cecilii Payne-Gaposchkin, z lat dwudziestych, zgodnie z którymi gwiazdy są zbudowane w około 90% z wodoru oraz w 8% z helu (zob. rozdział 6). W ten sposób nasze przewidywania dotyczące warunków panujących w pierwszych minutach Wielkiego Wybuchu doprowadziły do wyjaśnienia, dlaczego wodór i hel są dwoma najbardziej rozpowszechnionymi pierwiastkami we Wszechświecie, i dlaczego istnieją w takich proporcjach, jakie obserwujemy! Ten zdumiewający sukces modelu Wielkiego Wybuchu stanowi bardzo mocne uzasadnienie ekstrapolacji ekspansji Wszechświata do kilku minut po Wielkim Wybuchu, gdy temperatura wynosiła powyżej miliarda kelwinów.

Gamow i Alpher mieli początkowo nadzieję, że uda im się wyjaśnić pochodzenie wszystkich pierwiastków od Wielkiego Wybuchu, lecz ich obliczenia pokazały, że reakcje jądrowe zachodziły tylko wśród najlżejszych pierwiastków. Wszystkie ciężkie pierwiastki (łącznie z węglem, azotem i tlenem w naszych ciałach, a także niklem, żelazem i krzemem, które są składnikami Ziemi) powstały później w rdzeniach gwiazd, w procesach, które opisaliśmy w rozdziałach 7 i 8. Fred Hoyle, rywal Gamowa, próbował udowodnić coś dokładnie odwrotnego, mianowicie że zarówno ciężkie, jak i lekkie pierwiastki zostały stworzone w gwiazdach z wodoru, bez potrzeby odwoływania się do wczesnej, gorącej, gęstej fazy w historii Wszechświata. Hoyle poświęcił znaczną część swojej kariery procesom powstawania ciężkich pierwiastków w gwiazdach, w znacznym stopniu przyczyniając się do współczesnego rozumienia tych procesów, lecz ilość helu, który powstaje w gwiazdach nie jest wystarczająca, aby wyjaśnić takie rozpowszechnienie helu, jakie obserwujemy we Wszechświecie.

Obserwujemy także nieco deuteru, co również wskazuje na jego pochodzenie od Wielkiego Wybuchu. W rdzeniach gwiazd deuter (jeden proton i jeden neutron) jest raczej niszczony, a nie produkowany — jest zamieniany w hel. Gwiazdy nie produkują deuteru. Wielki Wybuch to jedyny znany nam proces, w którym powstaje deuter, a obliczenia ilości deuteru powstałego w pierwszych kilku minutach Wielkiego Wybuchu (jeden deuteron na czterdzieści tysięcy zwykłych jąder wodoru) są w doskonałej zgodności z obserwowaną wartością. Jądrowe procesy po Wielkim Wybuchu nagle się zatrzymały, gdy Wszechświat dostatecznie się rozrzedził, zostawiając resztkową ilość deuteru, który nie „zdążył" zamienić się w hel. We wczesnej fazie Wielkiego Wybuchu niektóre zmiany zachodziły tak szybko, że nie była

zachowana równowaga. Jest to kluczowy element wyjaśnienia, dlaczego dzisiaj obserwujemy tę niewielką ilość deuteru. Gamow zdawał sobie sprawę, że obserwowane obecnie rozpowszechnienie deuteru stanowi niezbity dowód niepozostawiający wątpliwości, że Wielki Wybuch został złapany na gorącym uczynku.

Gdy Wszechświat się rozszerza, przestrzeń się rozciąga, a długość fali fotonów podróżujących przez kosmos się zwiększa — jest to zjawisko przesunięcia ku czerwieni, które już omawialiśmy. Jeżeli przestrzeń się rozszerza, a my obserwujemy odległą galaktykę i rejestrujemy jej fotony, to widzimy, że te fotony uległy przesunięciu ku czerwieni. Galaktyka oddala się od nas, więc interpretujemy to przesunięcie ku czerwieni jako efekt Dopplera, lecz równie dobrze moglibyśmy zinterpretować je jako skutek rozszerzania samej przestrzeni — zwiększania odległości między nami i galaktyką oraz rozciągania fali fotonów podróżujących od galaktyki do nas. Narysuj falę na szerokiej gumowej taśmie i rozciągnij taśmę — długość fali wzrośnie. Obie interpretacje przesunięcia ku czerwieni są równoważne: możemy postrzegać przesunięcie ku czerwieni jako efekt Dopplera fali emitowanej przez odległy obiekt, który oddala się od nas na skutek ekspansji Wszechświata; możemy także interpretować przesunięcie ku czerwieni jako wydłużenie fali spowodowane przez wydłużenie samej przestrzeni. Fotony pochodzące z wczesnego Wszechświata zachowują swoje widmo (widmo ciała doskonale czarnego, zgodnie z rozkładem Plancka), lecz ich długości fali rosną na skutek rozszerzania przestrzeni; w rezultacie temperatura fotonów spada. Gamow i jego dwaj studenci, Alpher i Herman, stworzyli koncepcję Wszechświata zaczynającego się od gorącego Wielkiego Wybuchu, a następnie ochładzającego się w miarę upływu czasu i w miarę rozszerzania Wszechświata.

Około 1917 roku Einstein, rozważając ogólną strukturę Wszechświata, stworzył hipotezę, zwaną zasadą kosmologiczną: w dużej skali i w danym momencie Wszechświat wygląda mniej więcej tak samo z dowolnego punktu obserwacji. Jeżeli cofniemy się dostatecznie daleko i spojrzymy w dostatecznie dużej skali, to materia we Wszechświecie powinna być rozłożona jednorodnie. Jeden aspekt hipotezy Einsteina już poznaliśmy: ekspansja Wszechświata wygląda tak samo z perspektywy dowolnej galaktyki, z czego wyciągnęliśmy wniosek, że Wszechświat nie ma centrum. Na tej samej zasadzie nieskończona płaszczyzna nie ma punktu, który można by nazwać „środkiem płaszczyzny", a zakrzywiona powierzchnia sfery nie ma punktu, który można by nazwać „środkiem sfery", gdyż wszystkie punkty sfery są równoważne.

Gdy patrzymy na Wszechświat wokół nas, to oczywiście nie widzimy niczego jednorodnego. Masa naszego Układu Słonecznego jest skoncentrowana w Słońcu i w planetach. Odległości między gwiazdami są ogromne w porównaniu z rozmiarami gwiazd. Gwiazdy są skupione w galaktykach oddalonych od siebie o miliony lat świetlnych. Galaktyki łączą się w gromady. Zasada kosmologiczna Einsteina sugeruje jednak, że powinniśmy spojrzeć szerzej, w skali setek tysięcy galaktyk. Dopiero wtedy zobaczymy, że Wszechświat jest w przybliżeniu jednorodny. Obserwacje Hubble'a pokazały,

że liczba słabych galaktyk w różnych kierunkach była zbliżona. W największych skalach Wszechświat rzeczywiście robił wrażenie przestrzennie jednorodnej struktury.

Fred Hoyle zrobił krok dalej i stwierdził, że Wszechświat jest nie tylko jednorodny przestrzennie — mniej więcej taki sam w każdym kierunku — ale jest także jednorodny w czasie. Jeżeli spojrzysz wstecz w czasie, Wszechświat powinien wyglądać tak samo jak dzisiaj. Prawa fizyki nie zmieniają się w czasie, więc dlaczego Wszechświat miałby się zmieniać? Gdyby potraktować tę koncepcję dosłownie, nie mogłoby być Wielkiego Wybuchu ani początku Wszechświata w żadnej innej formie — Wszechświat istniałby zawsze. Hoyle nazwał tę ideę doskonałą zasadą kosmologiczną. Aby uwzględnić fakt, że odległości między galaktykami zwiększają się na skutek ekspansji Wszechświata, Hoyle wysunął dodatkową hipotezę, zgodnie z którą w przestrzeni między galaktykami powstaje nowa materia, która następnie tworzy nowe galaktyki. Nieco szalony pomysł, ale — zdaniem Hoyle'a — nie aż tak szalony jak powstanie całego Wszechświata w stanie o nieskończonej gęstości i nieskończonej temperaturze, w jednej chwili, stanowiącej początek czasu.

Który z tych modeli jest poprawny? W miarę jak badamy przewidywania modelu Wielkiego Wybuchu i porównujemy je z obserwacjami, mamy coraz silniejsze empiryczne dowody na rzecz Wielkiego Wybuchu.

Widzimy oczywiście, że poprawny jest pierwszy wniosek, jaki płynie z modelu Wielkiego Wybuchu, czyli rozszerzanie Wszechświata. Model przewiduje także wiek Wszechświata — 13,8 miliarda lat — w zgodzie z nieco tylko krótszym wiekiem najstarszych obserwowanych gwiazd. To jest niewątpliwy sukces modelu Wielkiego Wybuchu: gdybyśmy znaleźli gwiazdy, które mają bilion lat, musielibyśmy uznać, że model Wielkiego Wybuchu nie może być poprawny. W rzeczy samej, w przeszłości przeszliśmy przez taki kryzys: pierwsze oszacowanie stałej Hubble'a, wykonane przez samego Hubble'a, dało wynik $H_0 = 500\,(\mathrm{km/s})/\mathrm{Mpc}$, co przekłada się na wiek Wszechświata ($1/H_0$, czyli czas, jaki upłynął od Wielkiego Wybuchu), równy zaledwie dwóm miliardom lat. W latach trzydziestych wiedziano już, na podstawie radioaktywnego datowania skał, że niektóre ziemskie skały sa starsze. Wiek Ziemi był sprzeczny z modelem Wielkiego Wybuchu — Ziemia nie może przecież być starsza niż sam Wszechświat! Ta sprzeczność stanowiła argument na rzecz modelu Hoyle'a, ponieważ w jego modelu Wszechświat jest nieskończenie stary, nieustannie się rozszerza, a nowe galaktyki wciąż powstają w przestrzeni. Ta rozbieżność okazała się pozorna i została usunięta, gdy w latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych wykonano dokładniejsze pomiary odległości galaktyk, które znacznie zredukowały wartość stałej Hubble'a, dzięki czemu wiek Wszechświata ($1/H_0$) stał się spójny z wiekiem najstarszych gwiazd.

Widzieliśmy także, że model Wielkiego Wybuchu przewiduje, iż na każde jądro helu we Wszechświecie powinno przypadać dwanaście jąder wodoru, a także czterdzieści tysięcy jąder wodoru na każde jądro deuteru. Dokładnie takie liczby wynikają z obserwacji, ale nie musiało tak być — zanim

spektroskopia stała się w pełni dojrzałą gałęzią nauki, a Cecilia Payne-Gaposchkin stwierdziła, że gwiazdy są zbudowane głównie z wodoru, mieliśmy bardzo słabe pojęcie o rozpowszechnieniu pierwiastków we Wszechświecie.

Oszacujmy liczby cząstek kilka minut po Wielkim Wybuchu. Niemal wszystkie neutrony zostały włączone w jądra helu. Reakcje jądrowe wygasły, ponieważ Wszechświat był zbyt chłodny i miał za małą gęstość. Oprócz helu oraz śladowych ilości jąder deuteru i litu obecne były także protony, elektrony, neutrina i fotony. Pozytony anihilowały z elektronami, produkując dodatkowe fotony i pozostawiając odpowiednią liczbę elektronów, których łączny ładunek równoważył ładunek wszystkich protonów. Było bardzo gorąco, a jak wiadomo, gorące obiekty emitują fotony, więc wszędzie było pełno fotonów. Wszechświat nadal się rozszerzał i ochładzał, malała jego gęstość, ale poza tym jego stan nie zmieniał się przez około 380 tysięcy lat.

Do tego momentu materia Wszechświata pozostawała w stanie zwanym plazmą (podobnie jak wnętrza gwiazd): jądra atomowe i elektrony nie tworzyły atomów, lecz poruszały się niezależnie. Jeżeli jakiś elektron został schwytany przez proton, tworząc neutralny atom wodoru, bardzo szybko został trafiony przez któryś z wielu wysokoenergetycznych fotonów obecnych w plazmie i został wyrzucony z atomu. Co więcej, fotony oddziałują bardzo silnie ze swobodnymi elektronami (czyli elektronami niezwiązanymi w atomach), więc dochodziło do bardzo częstych zderzeń, w których foton odbijał się od elektronu (w technicznym języku takie odbicie nazywa się rozpraszaniem) i zmieniał kierunek ruchu. W tym sensie ówczesny Wszechświat był nieprzezroczysty, podobnie jak gęsta mgła, w której nie widać dalszych obiektów, ponieważ fotony są rozpraszane. Z tego samego powodu wnętrze gwiazdy jest nieprzezroczyste, a energia wytwarzana w rdzeniu potrzebuje bardzo dużo czasu, rzędu setek tysięcy lat, aby dotrzeć (w postaci fotonów) do powierzchni.

Sytuacja zmieni się raptownie, gdy temperatura spadnie do 3000 K, około 380 tysięcy lat po Wielkim Wybuchu. W tym momencie fotony nie mają już dostatecznej energii, aby jonizować atomy wodoru. Elektrony i protony łączą się, tworząc neutralne atomy (kosmolodzy nazywają ten moment fazą rekombinacji). Gaz neutralnych atomów wodoru nie rozprasza fotonów tak silnie jak gaz swobodnych elektronów, i Wszechświat nagle staje się przezroczysty — mgła opadła. Fotony mogą teraz podróżować wzdłuż linii prostych.

Wynika stąd, że my, w dzisiejszym Wszechświecie, powinniśmy widzieć fotony, które biegną swobodnie do nas od czasu, gdy Wszechświat stał się przezroczysty. Jeżeli Wszechświat nie ma granic, to powinniśmy rejestrować te fotony z każdego kierunku na niebie. Inaczej mówiąc, gdziekolwiek spojrzymy, powinna tam być materia w odpowiedniej odległości — takiej, że fotony wyemitowane 380 tysięcy lat po Wielkim Wybuchu docierają do nas właśnie dzisiaj.

Te fotony emituje gaz o temperaturze 3000 K, więc powinny mieć widmo ciała doskonale czarnego odpowiadające tej temperaturze. Takie widmo ma

maksimum przy długości fali około 1 mikrona (10^{-6} metra). Musimy jednak wziąć pod uwagę jeden istotny aspekt — Wszechświat się rozszerza! To termiczne (3000 K) promieniowanie podlega przesunięciu ku czerwieni. Wszechświat rozszerzył się o czynnik około 1000 od momentu, gdy miał 380 tysięcy lat, do dzisiaj, czyli 13,8 miliarda lat później. Długość fali promieniowania została rozciągnięta o taki sam czynnik, wraz z rozszerzającą się przestrzenią. Zatem maksimum promieniowania termicznego wypada teraz przy długości fali 1 milimetra, a nie 1 mikrona. Skoro długość fali dla maksimum promieniowania wzrosła tysiąc razy, to temperatura zmalała o taki sam czynnik. Oznacza to, że powinniśmy obserwować promieniowanie termiczne o temperaturze 3 K biegnące do nas ze wszystkich kierunków na niebie. Promieniowanie to pochodzi z czasów, gdy Wszechświat miał zaledwie 380 tysięcy lat, 0,003% obecnego wieku.

W 1948 roku Ralph Alpher i Robert Herman, studenci Gamowa, przewidywali, że dzisiejszy Wszechświat powinien nadal być wypełniony przez promieniowanie pozostałe po Wielkim Wybuchu, oraz obliczyli, że jego temperatura powinna do dzisiaj obniżyć się do około 5 K — całkiem blisko poprawnej wartości.

Przewidywania Hermana i Alphera zostały w zasadzie zapomniane, ale w latach sześćdziesiątych Bob Dicke, Jim Peebles, Dave Wilkinson i Peter Roll z wydziału fizyki Uniwersytetu Princeton przeprowadzili podobne rozumowanie i doszli do tego samego wniosku. Poszli jednak krok dalej. Zdali sobie sprawę, że promieniowanie termiczne z maksimum na długości fali 1 milimetra powinno dać się zarejestrować przy użyciu teleskopów i czujników, które Dicke wówczas konstruował (co oznacza, że poszukiwali mikrofal, czyli promieniowania z tego samego zakresu długości fali, które generują kuchenki mikrofalowe). Aby dokonać detekcji termicznego promieniowania pochodzącego z wczesnego Wszechświata (i przekonać się, czy ich hipoteza, a zarazem cała koncepcja Wielkiego Wybuchu jest poprawna), zbudowali mikrofalowy teleskop na dachu jednego z budynków na kampusie Uniwersytetu Princeton.

Zostali wyprzedzeni. Był rok 1964, początek ery podboju kosmosu. Inżynierowie w Bell Laboratories rozważali pomysł, aby użyć satelitów do międzykontynentalnej komunikacji. W Holmdel, w stanie New Jersey, zbudowali prototyp takiego systemu komunikacji — radioteleskop zaprojektowany do detekcji fal radiowych odbitych od wyniesionego na dużą wysokość balonu. Dwaj naukowcy, Arno Penzias i Robert Wilson, użyli tego teleskopu, aby sporządzić mapę nieba na mikrofalowej długości fali. Ku swemu zdumieniu odkryli promieniowanie mikrofalowe nadchodzące z każdego kierunku, w który wycelowali swój teleskop. Gdy wieści o ich odkryciu dotarły do Princeton, tamtejsza grupa zdała sobie sprawę, że Penzias i Wilson odkryli mikrofalowe promieniowanie tła (CMB). Dwa artykuły — artykuł z Princeton na temat ich przewidywań oraz artykuł Penziasa i Wilsona na temat ich odkrycia — zostały opublikowane obok siebie w „Astrophysical Journal” w maju 1965 roku.

W ten sposób kolejny fundamentalny wniosek wynikający z modelu Wielkiego Wybuchu został zweryfikowany przez wyniki obserwacji. Mikrofalowe promieniowanie tła zostało wyemitowane w całym Wszechświecie, gdy miał on 380 tysięcy lat, i powinno nadal rozchodzić się w całym Wszechświecie z natężeniem niezależnym od kierunku. Dokładnie to obserwujemy. W rzeczy samej, to promieniowanie uświadamia nam, że Wielki Wybuch zdarzył się wszędzie, nie miał dobrze zdefiniowanego środka, a pozostałość promieniowania termicznego Wielkiego Wybuchu dociera do nas jednakowo z każdego kierunku. W 1967 roku Penzias i Wilson opublikowali wyniki pomiarów, z których wynikało, że kierunkowa zależność natężenia nie przekracza kilku procent. W miarę rozwoju technologii pomiary były stopniowo ulepszane; jak zobaczymy poniżej, mikrofalowe promieniowanie tła jest jednorodne ze zdumiewającą dokładnością równą jeden do 10^5.

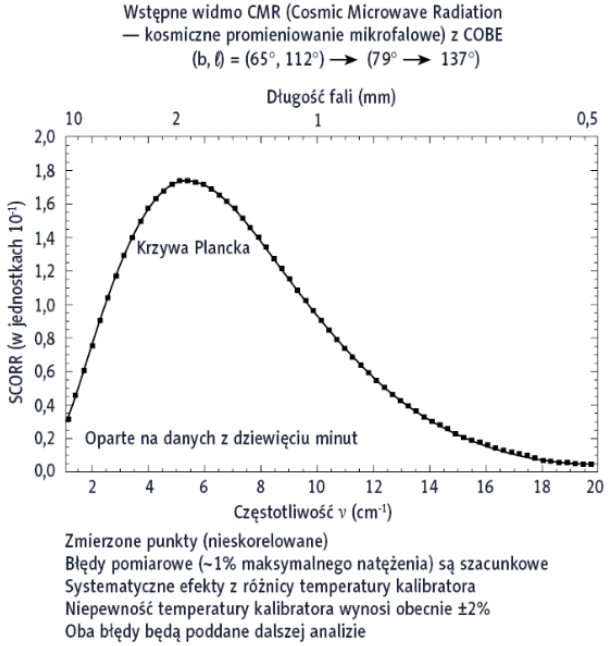
W swoim artykule Alpher i Herman przewidywali, że temperatura mikrofalowego promieniowania tła powinna być równa około 5 K. Penzias i Wilson zmierzyli i w swoim pierwszym artykule opublikowali temperaturę 3,5 K (późniejsze, bardziej dokładne pomiary dały wynik 2,725 K). Wynik pomiaru był zadziwiająco bliski pierwotnemu oszacowaniu Alphera i Hermana. Odkrycie CMB przekonało społeczność astronomów, że model Wielkiego Wybuchu jest poprawny. W modelu niezmiennego Wszechświata w ramach teorii stanu stacjonarnego, której rzecznikiem był Fred Hoyle, nie ma naturalnego sposobu, aby wyjaśnić CMB, natomiast w modelu Wielkiego Wybuchu jest to bezpośredni i nieunikniony wniosek. W taki sposób rozwija się nauka — nieustannie poddając testom swoje hipotezy, naukowcy odrzucają jedne idee, a do innych nabierają zaufania. Za swoje odkrycie Penzias i Wilson otrzymali nagrodę Nobla w 1978 roku.

W 1965 roku Peebles i Wilkinson dopiero zaczynali swoje naukowe kariery. Po odkryciu CMB zdecydowali się poświęcić kosmologii, czyli badaniu Wszechświata jako całości. Jim Peebles stał się jednym z najwybitniejszych teoretyków w tej dziedzinie. Dave Wilkinson wykonał serię coraz bardziej wyrafinowanych pomiarów CMB, najpierw przy użyciu radioteleskopów na Ziemi, a następnie umieszczał teleskopy na satelitach i wysyłał w kosmos, aby zebrać dane w przestrzeni (w tym miejscu powinienem wspomnieć, że Wilkinson jest moim naukowym dziadkiem. Promotor mojej pracy doktorskiej, Marc Davis, swój doktorat zrobił w 1974 roku pod kierunkiem Dave'a Wilkinsona).

Wilkinson próbował znaleźć odpowiedź na pytanie, czy widmo CMB jest rzeczywiście widmem promieniowania ciała doskonale czarnego. Wilkinson był jednym z naukowych liderów projektu COBE (Cosmic Background Explorer — Kosmiczny Badacz Tła, satelita NASA), którego celem był pomiar CMB z wysoką dokładnością. Misja COBE odniosła spektakularny sukces. Widmo CMB zmierzone przez satelitę COBE jest zgodne z krzywą Plancka z bardzo dużą dokładnością. Ten eksperyment został nazwany najbardziej dokładnym pomiarem widma ciała doskonale czarnego w przyrodzie (il. 15.1).

Kolejnym wielkim problemem, któremu Wilkinson stawił czoło, było pytanie, jak bardzo jednorodne jest CMB. Inaczej mówiąc, czy ma takie samo

natężenie (lub, co na jedno wychodzi, taką samą temperaturę) w każdym kierunku. Zasada kosmologiczna, zgodnie z którą Wszechświat jest jednorodny w bardzo dużych skalach, przewiduje, że CMB powinno być ekstremalnie jednorodne. Wykonując swoje pierwsze pomiary, Penzias i Wilson byli w stanie oszacować kierunkową jednorodność CMB z dokładnością rzędu kilku procent. Pod koniec lat siedemdziesiątych Wilkinson i inni badacze odkryli, że temperatura CMB nie jest dokładnie taka sama we wszystkich kierunkach, lecz zmienia się płynnie — w zakresie około 0,006 K — w zależności od kierunku na niebie. Przyczyna tej zmienności dość szybko stała się oczywista. Oprócz względnego ruchu galaktyk, związanego z ogólną ekspansją Wszechświata, galaktyki mogą się poruszać względem siebie pod wpływem wzajemnych oddziaływań grawitacyjnych. Na dodatek, Słońce krąży wokół centrum naszej galaktyki. Wszystkie te ruchy łącznie powodują, że Słońce porusza się z prędkością około 300 km/s względem całej materii Wszechświata, która jest źródłem CMB. Ruch Słońca jest przyczyną efektu Dopplera, z przesunięciem rzędu jednej części na tysiąc (ponieważ 300 km/s jest równe około 1/1000 prędkości światła). Mikrofalowe promieniowanie tła jest nieznacznie przesunięte ku fioletowi w kierunku ruchu Słońca, i nieznacznie przesunięte ku czerwieni w przeciwnym kierunku, a w pośrednich kierunkach zmienia się płynnie — dokładnie tak, jak obserwujemy.



ILUSTRACJA 15.1. Wstępny wykres widma mikrofalowego promieniowania tła (CMB) uzyskany przez COBE. Gdy w 1990 roku w czasie seminarium na Uniwersytecie Princeton David Wilkinson pokazał widmo CMB, zmierzone przez satelitę COBE, widownia wpadła w zachwyt i zaczęła klaskać. Zgodność zmierzonego widma z teoretyczną krzywą Plancka dla promieniowania termicznego jest spektakularna. Małe czarne kwadraty reprezentują błędy pomiarowe. Krzywa Plancka (linia ciągła) jest na tym wykresie narysowana w skali liniowo-liniowej. Krzywe Plancka pokazane w rozdziałach 4 i 5 wyglądają nieco inaczej, ponieważ są narysowane w skali logarytmiczno-logarytmicznej

Photo credit: zaadaptowane z kolekcji J. Richarda Gotta

W tym miejscu powinniśmy robić przerwę, aby powtórnie omówić, w jaki sposób poruszamy się w przestrzeni — wbrew naszym zmysłom, które stwarzają złudzenie, jakbyśmy tkwili nieruchomo. Ziemia wiruje wokół własnej osi; na szerokościach geograficznych Ameryki Północnej odpowiada to prędkości liniowej około 270 m/s (na szerokości geograficznej Poznania około 284 m/s, Krakowa około 299 m/s). Ziemia krąży wokół Słońca z prędkością około 30 km/s. Słońce krąży wokół centrum Drogi Mlecznej z prędkością 220 km/s, a Droga Mleczna i Galaktyka Andromedy spadają na siebie z prędkością około 100 km/s. I wreszcie, obie galaktyki razem poruszają się z prędkością około 600 km/s względem średniej prędkości całej materii w obserwowalnym Wszechświecie. Gdy dodamy wszystkie te ruchy w rozmaitych kierunkach, okaże się, że Słońce porusza się z prędkością około 300 km/s względem CMB. Można dostać zawrotu głowy, gdy próbujemy sobie wyobrazić wszystkie te ruchy, i zarazem jest to doskonała ilustracja stwierdzenia Galileusza (w ostatecznej formie wyrażonego w teoriach względności Einsteina), że istotne są względne ruchy. Bez wyrafinowanych przyrządów astronomicznych po prostu postrzegamy samych siebie tak, jakbyśmy tkwili nieruchomo.

Przesunięcie Dopplera wywołane przez nasz ruch względem CMB powoduje płynne odchylenie od jednorodnego rozkładu, rzędu jednej tysięcznej. Zostało ono zmierzone z dużą dokładnością, więc możemy je odjąć od całości. W następnej kolejności Wilkinson próbował znaleźć odpowiedź na pytanie, czy w widmie CMB istnieją zmarszczki, które nie są konsekwencją naszego ruchu, lecz stanowią immanentną cechę promieniowania. Jeżeli nasz model Wielkiego Wybuchu jest poprawny, to odpowiedź powinna być pozytywna, ponieważ wczesny Wszechświat nie mógł być idealnie gładki, pozbawiony jakichkolwiek odchyleń od jednorodności. Doskonale jednorodny wszechświat będzie się jednorodnie rozszerzał i nigdy nie powstaną w nim żadne struktury — nie pojawią się galaktyki, gwiazdy, planety ani ludzie, którzy będą spoglądać w niebo i zastanawiać się, co to wszystko znaczy. Sam fakt, że żyjemy we Wszechświecie ze strukturą, z rzeczywistymi odchyleniami od jednorodności — we Wszechświecie, w którym my sami istniejemy — mówi nam, że wczesny Wszechświat nie mógł być idealnie jednorodny, a zatem i mikrofalowe promieniowanie tła nie może być idealnie jednorodne.

W jaki sposób we wczesnym Wszechświecie pojawiły się struktury? Rozważmy niewielki obszar wczesnego Wszechświata, którego gęstość jest nieco wyższa niż w sąsiednich obszarach. Masa materii w tym obszarze jest także nieco większa, więc jej grawitacyjne przyciąganie jest nieco silniejsze niż przyciąganie sąsiednich obszarów. Jakiś atom wodoru lub cząstka ciemnej materii w pobliżu tego obszaru będzie przyciągana przez ten obszar, jeszcze bardziej zwiększając jego gęstość, zmniejszając zarazem gęstość sąsiednich obszarów. Materia będzie wpadać do tego obszaru, zwiększając jego masę, a tym samym zwiększając jego przewagę w grawitacyjnych zawodach w przeciąganie liny. W miarę upływu czasu ten proces będzie powodował, że nieznaczne fluktuacje gęstości materii będą wzmacniane. W zasadzie to

wystarcza, aby powstały struktury, które obecnie widzimy wokół siebie. Jim Peebles miał cudownie zwięzły sposób opisu tego procesu: „Grawitacja ssie!”[6].

Biorąc pod uwagę struktury, które obecnie obserwujemy we Wszechświecie, i znając fizykę grawitacji, czy możemy obliczyć, jak duże powinny być fluktuacje materii we wczesnym Wszechświecie (i tym samym, jak duża będzie obserwowana niejednorodność CMB)? Obliczenia są dość skomplikowane ze względu na fakt, że Wszechświat się rozszerza i równocześnie grawitacja próbuje tworzyć grudki materii. Trzeba także uwzględnić wszystkie składniki materii, zarówno ciemną materię, jak i zwykłą materię zrobioną z atomów. Wspomnieliśmy wcześniej, że gdy Wszechświat był całkowicie zjonizowany (przed upływem 380 tysięcy lat od Wielkiego Wybuchu), fotony nieustannie rozpraszały się na swobodnych elektronach. Ciśnienie tych fotonów powstrzymywało wzrost fluktuacji w rozkładzie zwykłej materii (elektronów i protonów) pod wpływem grawitacji. Ale gdyby uwzględnić tylko ciśnienie fotonów, fluktuacje zaczęłyby pod wpływem grawitacji rosnąć od momentu, gdy Wszechświat stał się przezroczysty dla fotonów, i obserwowana obecnie niejednorodność CMB musiałaby być większa.

Jim Peebles uświadomił sobie w latach osiemdziesiątych, że za tę rozbieżność może być odpowiedzialna ciemna materia. Ciemna materia jest ciemna, co oznacza, że nie oddziałuje z fotonami, a zatem fluktuacje ciemnej materii były niewrażliwe na ciśnienie fotonów i mogły swobodnie rosnąć pod wpływem grawitacji. Gdy Wszechświat stał się przezroczysty dla fotonów, zwykła materia była wciągana przez grudki ciemnej materii, które już rosły od jakiegoś czasu. W rezultacie, jeżeli ciemna materia brała udział w powstawaniu fluktuacji zwykłej materii, musimy dojść do wniosku, że początkowe fluktuacje CMB były mniejsze, niż gdyby uwzględnić tylko istnienie zwykłej materii. Obserwacje wykonane w latach osiemdziesiątych umożliwiły tak dokładne pomiary fluktuacji CMB, że wszystkie modele, które nie uwzględniały ciemnej materii, zostały wyeliminowane.

A zatem ciemna materia, której istnienie wywnioskowaliśmy z rotacji galaktyk, jest także niezbędna, aby zrozumieć CMB. Czym jest ciemna materia? Szczegółowe porównania rozpowszechnienia helu i deuteru z przewidywaniami i wnioskami wynikającymi z procesów zachodzących we wczesnym Wszechświecie mówią nam, że średnia gęstość zwykłej materii (czyli materii złożonej z protonów, neutronów i elektronów) to zaledwie 4×10^{-31} grama na centymetr sześcienny. To oznacza zaledwie jeden proton na cztery metry sześcienne! To kolejny sposób, aby się przekonać, jak ogromne (i na ogół puste) są przestrzenie między gwiazdami w galaktykach oraz między galaktykami. Obserwacje ruchów galaktyk, a także pomiary fluktuacji CMB (które za chwilę omówimy) wskazują jednak, że całkowita gęstość materii we Wszechświecie jest mniej więcej sześć razy większa. Różnica wynika z obecności ciemnej materii, która nie jest zbudowana ze zwykłych protonów, neutronów i elektronów. Podejrzewamy, że ciemna materia jest zbudowana z niewidocznych cząstek elementarnych nieznanego dotychczas typu, które zapewne powstały w ekstremalnych warunkach (w

wysokiej temperaturze i pod wysokim ciśnieniem) wczesnego Wszechświata, podobnie zresztą jak protony, neutrony i elektrony. Istnieje wiele spekulatywnych teorii dotyczących natury cząstek elementarnych ciemnej materii. Teoria supersymetrii przewiduje, że każda cząstka zwykłej materii powinna mieć masywnego supersymetrycznego partnera: fotino dla fotonu, selektron dla elektronu, grawitino dla grawitonu i tak dalej. W akceleratorze Large Hadron Collider w CERN-ie trwa poszukiwanie takich cząstek. Gdyby któraś z nich została odkryta, teoria supersymetrii zostałaby potwierdzona. W 1982 roku Jim Peebles zasugerował, że ciemna materia jest złożona ze słabo oddziałujących masywnych cząstek (tak, astronomowie rzeczywiście używają określenia WIMP[7]), znacznie bardziej masywnych niż proton. Najlżejszy supersymetryczny partner którejś ze znanych cząstek zwykłej materii mógłby pełnić tę rolę. W 1982 roku George Blumenthal, Heinz Pagels i Joel Primack wysunęli kandydaturę grawitino. To musi być najlżejsza supersymetryczna cząstka, ponieważ w teorii supersymetrii cięższe cząstki są niestabilne, rozpadają się na lżejsze, więc się nie nadają.

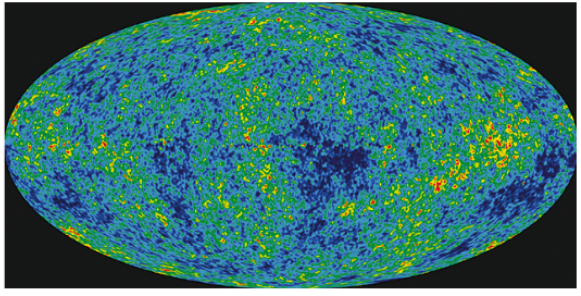
Według innej spekulatywnej teorii ciemna materia składa się z cząstek elementarnych zwanych aksjonami. Large Hadron Collider, akcelerator leżący na granicy Szwajcarii i Francji, jest naszą największą nadzieją na odkrycie i zidentyfikowanie któregoś z tych kandydatów. Jeżeli jednak ciemna materia jest głównym źródłem masy Drogi Mlecznej, to spodziewamy się, że cząstki ciemnej materii powinny być wszędzie wokół nas. Cząstki ciemnej materii powinny w tej chwili przenikać przez twoje ciało, ale skoro są ciemne, to znaczy, że w zasadzie nie oddziałują ze zwykłą materią (nie licząc grawitacji). W hipotetycznych teoriach (supersymetrii i aksjonów) cząstki ciemnej materii mogą sporadycznie oddziaływać z jądrami atomów zwykłej materii, wywołując reakcje, które mamy nadzieję zaobserwować. Eksperymentatorzy wciąż poszukują takich reakcji. W jednym z takich eksperymentów próbują zarejestrować błyski światła, które pojawią się, gdy cząstka ciemnej materii zderzy się z jądrem ksenonu w zbiorniku zawierającym 100 kilogramów ciekłego ksenonu. W tych eksperymentach aparaturę umieszcza się głęboko w opuszczonych kopalniach, aby zminimalizować oddziaływania z cząstkami zwykłej materii. Jak dotąd nie znaleziono przekonujących dowodów na istnienie ciemnej materii, ale eksperymentalne ograniczenia jej właściwości dopiero zbliżają się do zakresu, który przewidują modele teorii cząstek. Poszukiwania cząstek ciemnej materii stanowią jeden z aktualnych kierunków badań w fizyce cząstek.

Zakładając istnienie ciemnej materii, spodziewamy się, że CMB będzie jednorodne, a jego fluktuacje powinny być na poziomie jeden do stu tysięcy. Przyrządy na pokładzie satelity COBE zostały tak zaprojektowane, aby mogły zarejestrować te fluktuacje. Pamiętam, że uczestniczyłem w seminarium w 1992 roku dla społeczności astronomów w Princeton, gdzie Dave Wilkinson prezentował wyniki pomiarów satelity. Fluktuacje CMB, których oczekiwaliśmy (zgodnie z przewidywaniami dotyczącymi wzrostu struktur w gorącej fazie Wielkiego Wybuchu), zostały w końcu wykryte, na poziomie

jeden do stu tysięcy, dokładnie takim, jaki przewidywali Peebles i inni badacze.

W tym czasie Wilkinson myślał już o satelicie następnej generacji, z przyrządami o jeszcze większej czułości, zdolnymi do mierzenia tych fluktuacji (w żargonie zwanych anizotropiami). Wilkinson stworzył zespół (w którym było wielu weteranów misji COBE), aby zbudować Microwave Anisotropy Probe (MAP)[8]. MAP został wysłany w kosmos w 2001 roku i mapował niebo przez dziewięć lat.

W tym czasie Wilkinson, niestety, chorował na nowotwór. Zdążył jeszcze zobaczyć pierwsze wyniki z satelity, zanim zmarł we wrześniu 2002 roku. W lutym 2003 roku zespół opublikował wyniki z pierwszego roku obserwacji. NASA zdecydowała się zmienić nazwę satelity — od tego czasu jest znany jako Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP).

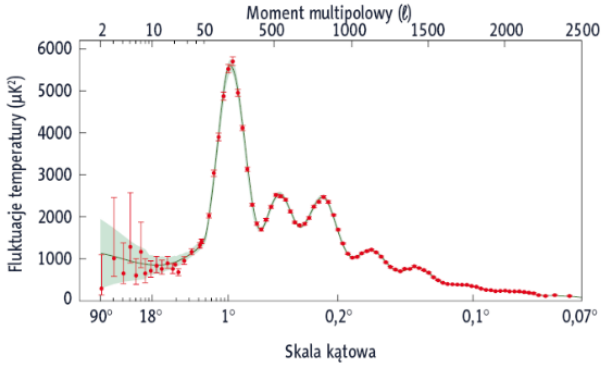


ILUSTRACJA 15.2. Mapa kosmicznego promieniowania tła; wynik dziewięciu lat obserwacji satelity WMAP, 2010. Jest to mapa całego nieba w takiej samej projekcji jak na ilustracjach 11.1 i 12.2. Odjęte zostało mikrofalowe promieniowanie samej Drogi Mlecznej oraz przesunięcie Dopplera związane z ruchem Ziemi względem kosmicznego promieniowania tła. Czerwonym kolorem oznaczone są obszary, gdzie lokalna temperatura nieznacznie przekracza średnią wartość; niebieskim — nieznacznie poniżej średniej wartości; zielonym — średnia wartość temperatury

Photo credit: satelita WMAP, NASA

Ilustracja 15.2 przedstawia mapę fluktuacji temperatury kosmicznego promieniowania tła na podstawie danych zebranych przez satelitę WMAP po dziewięciu latach obserwacji (w 2010 roku). Eliptyczny kształt odwzorowuje całą sferę niebieską. Północny biegun galaktyczny jest u góry mapy, południowy biegun galaktyczny u dołu, a galaktyczny równik, leżący w płaszczyźnie Drogi Mlecznej jest odwzorowany jako prosta linia przechodząca poziomo przez środek mapy. Odjęte (wyeliminowane) zostało promieniowanie ośrodka międzygwiezdnego Drogi Mlecznej oraz odchylenie (o względnej wartości 1/1000) spowodowane przez ruch Ziemi względem kosmicznego promieniowania tła.

W pewnym sensie jest to dziecięca fotografia Wszechświata. Widzimy na niej Wszechświat taki, jaki był, gdy miał maleńki ułamek swojego obecnego wieku. Te fotony podróżowały do nas przez całe 13,8 miliarda lat istnienia Wszechświata, oprócz tych początkowych 380 tysięcy lat. Kontrast na mapie jest powiększony — najgłębsze odcienie czerwonego lub niebieskiego koloru odpowiadają fluktuacjom kilka razy większym niż ±0,001%; przeciętne wartości są rzędu ±0,001% (czyli jedna część na sto tysięcy).



ILUSTRACJA 15.3. Amplituda fluktuacji mikrofalowego promieniowania tła (czerwone kropki) w funkcji skali kątowej w porównaniu z teorią (zielona krzywa); Planck Satellite Team (zespół satelity Planck, ESA) 2013. Na osi pionowej odłożona jest amplituda fluktuacji temperatury mikrofalowego promieniowania tła w funkcji kątowej skali fluktuacji w stopniach (skala logarytmiczna na osi poziomej). Jednostką na osi pionowej jest mikrokelwin do kwadratu reprezentujący zakres fluktuacji obejmujący około jednej części na sto tysięcy wokół jednorodnej temperatury 2,7325 K. Widoczne na wykresie oscylacje pochodzą od fal dźwiękowych propagujących się we wczesnym Wszechświecie do momentu rekombinacji. Ciągła zielona krzywa, przechodząca przez czerwone punkty, wynika z modelu Wielkiego Wybuchu z uwzględnieniem efektów ciemnej materii, ciemnej energii oraz inflacji (o której powiemy więcej w rozdziale 23); zasadniczo doskonała zgodność teorii i obserwacji jest oszałamiającym potwierdzeniem poprawności modelu Wielkiego Wybuchu. Taki sam wniosek wynikał z wcześniejszych danych z satelity WMAP (NASA)

Credit: dzięki uprzejmości ESA oraz Planck Collaboration

Ilustracja 15.3 pokazuje zmierzone fluktuacje temperatury CMB w funkcji skali kątowej (zwróć uwagę na skalę na osi poziomej). Te pomiary pochodzą od kolejnego satelity, nazwanego Planck, wystrzelonego przez Europejską Agencję Kosmiczną, a także od kilku różnych teleskopów naziemnych.

Widoczne na ilustracji 15.3 maksimum dla skali kątowej równej 1° odpowiada typowym rozmiarom „plamek", które widzimy na mapie WMAP z ilustracji 15.2. Wykres (il. 15.3) mówi nam między innymi, że na mapie WMAP odchylenia temperatury są większe dla plamek o rozmiarach 1° niż odchylenia dla plamek o rozmiarach 18°. Dla punktów, dla których błąd pomiarowy nie jest widoczny na wykresie, błędy obserwacyjne były mniejsze niż rozmiary czerwonej kropki.

Gładka zielona krzywa przechodząca przez czerwone punkty reprezentuje wyniki teoretycznych obliczeń opartych na teorii Wielkiego Wybuchu, uwzględniających efekty ciemnej materii, ciemnej energii oraz inflacji (o której powiemy więcej w rozdziale 23). Dla dużych wartości skali kątowej zielona linia poszerza się, obejmując przewidywany teoretycznie rozrzut oczekiwanych wyników. Zgodność teorii i obserwacji jest zdumiewająca: wyniki obserwacji układają się wzdłuż zielonej krzywej w granicach błędów obserwacyjnych. Model Wielkiego Wybuchu zaliczył kolejny sukces — przewidział szczegółowo naturę niezwykle subtelnych, drobnych fluktuacji widocznych w CMB.

Po rekombinacji (380 tysięcy lat od Wielkiego Wybuchu) materia zaczyna się gromadzić w coraz gęstsze grudki, z których powstaną pierwsze gwiazdy i

galaktyki. Biorąc pod uwagę kątowe rozmiary struktur, które obserwujemy w CMB, przypuszczamy, że powinny we Wszechświecie istnieć struktury w większych skalach niż tylko galaktyki, których liniowe rozmiary to zaledwie 100 tysięcy lat świetlnych. Inaczej mówiąc, rozkład galaktyk nie powinien być losowy, lecz powinny one być pogrupowane w większe struktury. Aby zbadać te struktury, odwołamy się ponownie do prawa Hubble'a. Przypomnijmy sobie, że gdy spoglądamy na astronomiczny obraz nieba, widzimy obiekty tak, jakby były namalowane wewnątrz dwuwymiarowej kopuły (sklepienia niebieskiego), nie mamy żadnej percepcji trzeciego wymiaru — głębi obrazu — i nie potrafimy łatwo odróżnić pobliskiej galaktyki od galaktyki położonej w większej odległości. Prawo Hubble'a daje nam jednak metodę badania trzeciego wymiaru — mierząc przesunięcie ku czerwieni galaktyki, możemy określić jej odległość, a następnie przekonać się, jak wygląda rozkład galaktyk we Wszechświecie.

Pod koniec lat siedemdziesiątych astronomowie zaczęli na poważnie mierzyć przesunięcia ku czerwieni tysięcy galaktyk, dzięki czemu mogli wykonywać trójwymiarowe mapy. Natychmiast zauważyli, że rozkład galaktyk wcale nie jest losowy: odkryli gromady galaktyk (o średnicach sięgających 3 milionów lat świetlnych) zawierające tysiące galaktyk, a także puste przestrzenie (o rozmiarach 300 milionów lat świetlnych), niemal zupełnie pozbawione galaktyk. Początkowo kwestionowano zasadę kosmologiczną. Struktury widoczne na mapach były tak wyraźne, że astronomowie zaczęli się zastanawiać, czy Wszechświat jest jednorodny w jakiejkolwiek skali; czy badania w jeszcze większej skali ujawnią jeszcze większe struktury. Program obserwacyjny Sloan Digital Sky Survey został zaprojektowany między innymi po to, aby znaleźć odpowiedź na te pytania. Teleskop Sloan Digital Sky Survey, przeznaczony do mapowania nieba, zmierzył już przesunięcia ku czerwieni dla ponad dwóch milionów galaktyk. Na ilustracji 15.4 przedstawiona jest mapa niewielkiego ułamka tych galaktyk, ukazująca szeroki na 4° wycinek wzdłuż równikowej płaszczyzny Ziemi. Gdybyśmy na jednym wykresie umieścili wszystkie dane, gęstość punktów byłaby tak duża, że ilustracja byłaby w całości zaczerniona i żadne struktury nie byłyby widoczne.

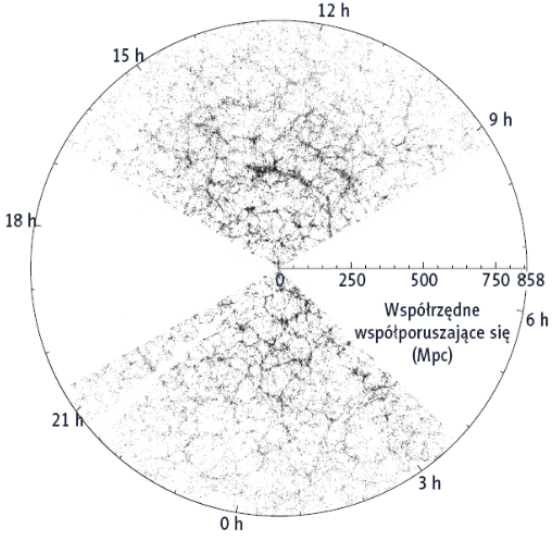
Każda z ponad pięćdziesięciu tysięcy kropek na tej ilustracji reprezentuje galaktykę, liczącą 100 miliardów gwiazd. Warto poświęcić chwilę, aby docenić ogrom tych liczb.

Widzimy dwa kawałki ciasta. Droga Mleczna jest w środku. Puste sektory po lewej i po prawej stronie nie były objęte tym przeglądem, ponieważ są to obszary zasłonięte przez obłoki pyłu Drogi Mlecznej, które utrudniają obserwacje odległych galaktyk.

Promień obserwacji wynosił 860 Mpc, niemal 3 miliardy lat świetlnych. W tej skali nawet gromada galaktyk jest mała; większość galaktyk leży wzdłuż włókien — pasm galaktyk o długości setek milionów lat świetlnych. Szczególnie wyróżniające się włókno, położone nieco powyżej środka, nazwane Sloan Great Wall (Wielka Ściana Sloan), rozciąga się na długości 1,37 miliarda lat świetlnych. Żadne struktury nie sięgają jednak na całą szerokość

sektora, co sugeruje, że w największej skali Einsteinowska zasada kosmologiczna działa.

Zwróć uwagę, że gęstość galaktyk na ilustracji 15.4 raptownie spada w pobliżu zewnętrznych granic mapy. Nie jest to jednak dowód, że zasada kosmologiczna jest błędna, lecz prosta konsekwencja faktu, że galaktyki w tych obszarach są położone najdalej od nas, a zatem są najsłabsze. Tylko niewielka część najdalej położonych galaktyk jest na tyle jasna, aby teleskop Sloan Digital Sky Survey był w stanie zmierzyć ich widma; przesunięcia ku czerwieni tych nielicznych galaktyk są uwzględnione na mapie.



ILUSTRACJA 15.4. Rozkład galaktyk w równikowej płaszczyźnie, wykonany przez Sloan Digital Sky Survey. Droga Mleczna jest w środku. Każda kropka reprezentuje jedną galaktykę. Dwa wycinki (górny i dolny) reprezentują galaktyki w obszarach objętych przez przegląd; dwa puste wycinki (po lewej i po prawej) reprezentują obszary nieobjęte przez przegląd. Promień na tym diagramie wynosi około 2,8 miliarda lat świetlnych

Credit: J. Richard Gott, M. Jurić i in., 2005, „Astrophysical Journal" 624, s. 463-484

Jeżeli porównamy mapę na ilustracji 15.4 z mapą CMB na ilustracji 15.2, nie wydaje się wcale takie oczywiste, że fluktuacje na poziomie jednej części na sto tysięcy mogą wyewoluować, nawet pod wpływem grawitacyjnej niestabilności, w tak niewiarygodnie złożone struktury, które obserwujemy dzisiaj w rozkładzie galaktyk. Przybliżone rozwiązania równań grawitacyjnej niestabilności (opartych na prawach Newtona, wraz z ekspansją Wszechświata, która dodatkowo komplikuje rachunki) mniej więcej się zgadzają z wynikami obserwacji, lecz bardziej dokładne rachunki wymagają użycia komputera. Symulacje komputerowe rozpoczyna się od rozkładu materii z niewielkim fluktuacjami na takim poziomie, jaki widzimy na mapie CMB na ilustracji 15.2. Następnie Wszechświat ewoluuje w komputerze — pod wpływem grawitacji, z uwzględnieniem ekspansji Wszechświata — przez 13,8 miliarda lat. Na rozkładach galaktyk, które generują takie symulacje komputerowe, widoczne są takie same struktury, jakie obserwujemy na mapach galaktyk: gromady, pustki, włókna, podobne rozmiary i kontrast.

Nikt oczywiście nie oczekuje, że symulacje komputerowe utworzą dokładnie takie struktury, jakie dzisiaj obserwujemy we Wszechświecie; spodziewamy się tylko, że odtworzą takie same właściwości statystyczne. Pamiętajmy, że fragment Wszechświata, który widzimy w CMB, jest bardzo daleko od nas; nie widzimy tam materii, która ewoluuje w galaktyki w naszym sąsiedztwie. Zakładamy jednak, że ogólne właściwości — łącznie z fluktuacjami — materii, która wyemitowała mikrofalowe promieniowania tła, są statystycznie takie same jak materia, z której powstały galaktyki wokół nas. Ogólnie rzecz biorąc, zakrojone na dużą skalę symulacje komputerowe oparte na modelu Wielkiego Wybuchu zadziwiająco wiernie odtwarzają włókniste, pajęcze struktury, które obserwujemy w realnym Wszechświecie.

I to jest końcowy triumf modelu Wielkiego Wybuchu. Na wszystkie możliwe sposoby przebadaliśmy przewidywania modelu i porównaliśmy je z obserwacjami. Wywnioskowaliśmy, że Wszechświat powstał 13,8 miliarda lat temu, co doskonale się zgadza z wiekiem najstarszych gwiazd (tzn. Wszechświat jest trochę starszy). Wywnioskowaliśmy, że jądra wodoru i helu powstały w ciągu pierwszych kilku minut od Wielkiego Wybuchu, w proporcji 12:1, dokładnie takiej, jaką dzisiaj obserwujemy. Potrafiliśmy przewidzieć, ile powstało deuteru, co również się zgadza z obserwacjami. Przewidzieliśmy istnienie mikrofalowego promieniowania tła, a także jego różne właściwości — widmo, temperaturę oraz jego niesamowitą jednorodność — dokładnie takie, jakie obserwujemy. Przewidzieliśmy, że CMB nie będzie idealnie jednorodne — przewidzieliśmy fluktuacje na poziomie jednej części na sto tysięcy z odchyleniami, które zależą od skali kątowej, a zależność jest opisana przez skomplikowaną krzywą. Pomiary wykonane przez satelity WMAP i Planck potwierdziły także i te przewidywania, co prawdopodobnie jest najbardziej imponującym osiągnięciem teorii Wielkiego Wybuchu. I na koniec — komputerowe symulacje, które modelują ewolucję fluktuacji pod wpływem grawitacji, przewidują w dzisiejszym Wszechświecie obecność złożonych struktur z galaktykami ułożonymi wzdłuż długich na setki milionów lat świetlnych włókien, dokładnie takich, jakie odkrył przegląd obserwacyjny Sloan Digital Sky Survey. Model Wielkiego Wybuchu jest czymś więcej niż „tylko teorią” — potwierdza go olbrzymia liczba empirycznych, ilościowych dowodów; śpiewająco przeszedł wszystkie testy, którym go poddaliśmy.

16 – Kwazary i supermasywne czarne dziury

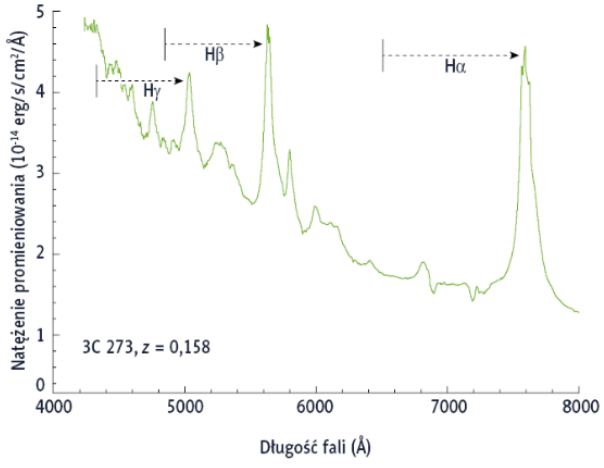
Michael A. Strauss

W latach pięćdziesiątych radioastronomia — badania promieniowania elektromagnetycznego o długości fali nieco dłuższej niż centymetr, emitowanego przez obiekty astronomiczne — była wciąż w powijakach. Ówczesne radioteleskopy wykonywały pierwsze mapy nieba. Identyfikacja źródeł tego promieniowania stanowiła poważne wyzwanie, ponieważ radioteleskopy nie miały odpowiedniej zdolności rozdzielczej, aby dokładnie

określić położenie obiektu odpowiedzialnego za emisję. Ich zdolność rozdzielcza była ograniczona do mniej więcej jednego stopnia, więc wcale nie było takie oczywiste, która z tysięcy gwiazd i galaktyk leżących w danym obszarze jest odpowiedzialna za emisję.

Najlepsze ówczesne radiowe mapy nieba powstały w Anglii. Astronomowie z Uniwersytetu Cambridge, którzy wykonali przegląd swoim radioteleskopem, sporządzili mapy oraz skatalogowali i opublikowali listę źródeł. Nasza opowieść zaczyna się od pozycji numer 273 w trzecim katalogu, zwanej w skrócie 3C 273. Trajektoria Księżyca od czasu do czasu przecina położenie 3C 273, więc porównując zanik i powrót radioemisji źródła z trasą Księżyca, astronomowie byli w stanie dokładniej wyznaczyć jego położenie na niebie. Następnie wykonali zdjęcia tego obszaru w świetle widzialnym, aby zobaczyć obiekt odpowiedzialny za radioemisję. Ku ich zaskoczeniu okazało się, że źródło 3D 273 jest gwiazdą niewidoczną gołym okiem, ale dostatecznie jasną, aby ją zbadać największym wówczas teleskopem w zakresie widzialnym, 200-calowym teleskopem w Palomar Observatory.

W 1963 roku Maarten Schmidt, młody profesor Caltechu w Pasadenie, wykonał (200-calowym teleskopem) pomiary jej widma, aby zbadać, z jakiego rodzaju gwiazdą mamy do czynienia. Gdy po raz pierwszy spojrzał na to widmo, nie był w stanie do niczego go dopasować.



ILUSTRACJA 16.1. Widmo kwazara 3C 273. Najsilniejsze linie emisyjne odpowiadają przejściom Balmera w wodorze oznaczonym odpowiednimi symbolami. Dla każdej z nich strzałka wskazuje przesunięcie (ku czerwieni, o 15,8%) od laboratoryjnej do obserwowanej długości fali. Pozostałe widoczne w widmie linie pochodzą od przejść w tlenie, helu, żelazie i innych pierwiastkach

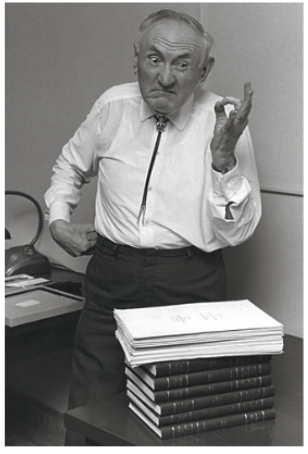
Credit: Michael A. Strauss, na podstawie danych z New Technology Telescope w La Silla, Chile; M. Türler i in., 2006, „Astronomy and Astrophysics" 451: L1-L4, http://isdc.unige.ch/3c273/#emmi, http://casswww.ucsd.edu/archive/public/tutorial/images/3C273z.gif

Widział wiele bardzo szerokich linii emisyjnych, których długości fali nie pasowały do żadnego znanego mu atomu. Początkowo sądził, że może to być jakiś bardzo nietypowy biały karzeł, ale w momencie olśnienia zdał sobie sprawę, że widzi układ linii Balmera dla wodoru, dobrze znany z obserwacji

gwiazd, lecz w innych położeniach. Wszystkie linie były przesunięte ku czerwieni o zdumiewające 16% (il. 16.1), czyli długość fali dla każdej linii w tym widmie była o 16% większa w stosunku do linii Balmera mierzonych w laboratorium na Ziemi.

Czy to mogłoby być przesunięcie ku czerwieni spowodowane przez ekspansję Wszechświata? Tak duże przesunięcie ku czerwieni odpowiada (jeżeli użyć obecnej wartości stałej Hubble'a) odległości około 2 miliardów lat świetlnych. Pewna niewielka liczba znanych wówczas galaktyk miała porównywalnie duże wartości przesunięcia ku czerwieni, ale były one niewiarygodnie słabe, na granicy możliwości pomiarowych ówczesnych teleskopów. 3C 273 był kilkaset razy jaśniejszy niż te słabe, rozmyte galaktyki. Co więcej, wyglądał jak gwiazda, jak punktowe źródło światła; nie był rozciągły jak galaktyka. Pozostały dwie możliwe interpretacje: (1) może ten obiekt jest bliżej niż 2 miliardy lat świetlnych — może nawet w obrębie naszej własnej galaktyki — a przesunięcie ku czerwieni nie ma nic wspólnego z rozszerzaniem Wszechświata; (2) ta gwiazda jest niewiarygodnie jasna. Prawo odwrotnych kwadratów mówi nam, że gdyby 3C 273 rzeczywiście znajdował się w odległości 2 miliardów lat świetlnych, to — przy obserwowanej jasności — jego moc absolutna musiałaby być kilkaset razy większa od mocy całej galaktyki zawierającej 10^{11} gwiazd!

Maarten Schmidt opowiedział o swoim odkryciu koledze, Jesse Greensteinowi. Okazało się, że Greenstein zmierzył widmo innego źródła, 3C 48. Greenstein natychmiast zdał sobie sprawę, że musi to być podobny obiekt, z jeszcze większym przesunięciem ku czerwieni, równym 0,37 (czyli 37%). Schmidt doszedł do wniosku, że musi być więcej takich obiektów, i że trzeba się zabrać do ich poszukiwania. Gdy on i inni astronomowie zaczęli znajdować kolejne gwiazdopodobne radioźródła z coraz większym przesunięciem ku czerwieni, potrzebowali dla nich nazwy. Pierwsze określenie, jakiego używali, brzmiało *quasi-stellar radio source* (dosł. obiekt gwiazdopodobny emitujący fale radiowe), ale było ono zdecydowanie za długie, więc szybko zostało skrócone do *quasar*, kwazar. Pierwsze kwazary zostały odkryte dzięki emisji fal radiowych, ale wkrótce po tych odkryciach Allan Sandage (ten od pomiaru stałej Hubble'a) znalazł gwiazdopodobne obiekty z wysokim przesunięciem ku czerwieni, które nie emitują fal radiowych; w rzeczywistości większość kwazarów słabo promieniuje w radiowym zakresie widma.



ILUSTRACJA 16.2. Fritz Zwicky pozuje ze swoimi katalogami galaktyk

Photo credit: Archives Caltech

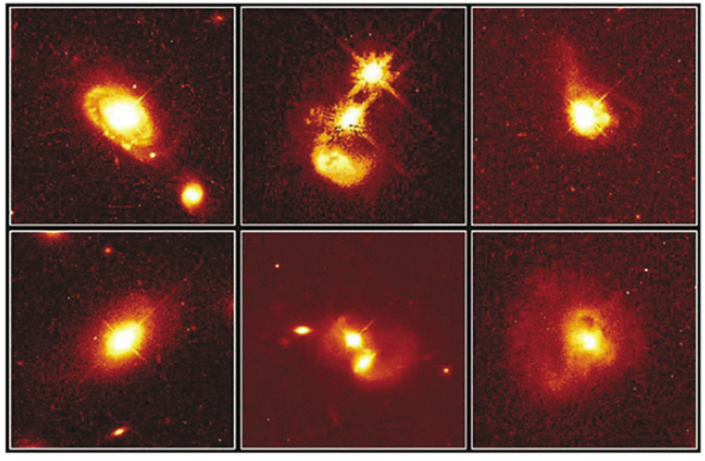
Fritz Zwicky, którego już spotkaliśmy w rozdziale 12, był kolegą Schmidta i Greensteina na Caltechu. Była to jedna z najbardziej błyskotliwych i zarazem ekscentrycznych osobowości dwudziestowiecznej astronomii (il. 16.2). Zwicky jest autorem kilku odkryć, które wyprzedziły swoją epokę i musiały upłynąć całe dziesięciolecia, zanim zostały uznane przez społeczność astronomów. Jak już pisaliśmy, był pierwszy, który z ruchów galaktyk w gromadach wywnioskował (w 1933 roku) obecność ciemnej materii. W społeczności astronomów ta idea zakorzeniła się dopiero w latach siedemdziesiątych, gdy Morton Roberts, Vera Rubin oraz ich współpracownicy zaczęli mierzyć rotacje zewnętrznych obszarów galaktyk, a Jeremiah P. Ostriker, Jim Peebles i Amos Yahil podali teoretyczne argumenty, z których wynika, że duże ilości ciemnej materii mogłyby zapewnić stabilność galaktycznych dysków. W 1934 roku Zwicky oraz jego kolega, Walter Baade wysunęli hipotezę (poprawną!), zgodnie z którą w eksplozjach supernowych mogą powstawać gwiazdy neutronowe; ta idea została potwierdzona trzydzieści lat później, wraz z odkryciem pulsarów. Skądinąd Zwicky i Baade są autorami określenia „supernowa". Zwicky przewidział (poprawnie!), dziesiątki lat przed obserwacyjnym potwierdzeniem, że dzięki efektowi ugięcia promieni światła, wynikającego z Einsteinowskiej ogólnej teorii względności, odległe galaktyki mogą działać jak soczewki, powiększając obrazy jeszcze dalszych galaktyk położonych wzdłuż linii obserwacji. No i Zwicky twierdził, że to on pierwszy odkrył kwazary.

Zwicky wiedział, że jest bystry i nie miał zahamowań, aby głośno mówić, co myśli, gdy uważał, że ktoś inny jest w błędzie. Odmówiono mu dostępu do 200-calowego teleskopu w Palomar, więc większość swojej pracy wykonał przy użyciu małego, 18-calowego teleskopu. Odkrył ponad sto supernowych i sporządził katalog galaktyk. Zauważył, że pewne galaktyki, które skatalogował, były dość zwarte, punktowe — wyglądały niemal jak gwiazdy. Nie mając dostępu do 200-calowego teleskopu, nie mógł zmierzyć ich widma, aby zbadać ich fizyczną naturę. Później okazało się, że niektóre z tych zwartych galaktyk są w istocie kwazarami, odkrytymi powtórnie przez Schmidta i Sandage'a. Zwicky uznał — nie bez racji — że należy mu się pierwszeństwo w odkryciu tych kwazarów.

Doktoranci — z którymi dzielił pomieszczenie w piwnicy budynku astronomii na kampusie Caltechu — uwielbiali Zwicky'ego. Miło wspominają go moi koledzy — Jim Gunn, który był doktorantem na Caltechu w latach sześćdziesiątych, i Rich Gott, który był postdokiem w latach 1973-1974. Zwicky zmarł w 1974 roku.

W kwestii kwazarów Zwicky w zasadzie miał rację. Niektóre zwarte galaktyki miały niewiarygodnie jasne, punktowe źródło światła (kwazar) w samym centrum galaktyki, które przewyższa blaskiem pozostałe, słabiej świecące obszary galaktyki. W rezultacie galaktyka świeci punktowo i wygląda jak gwiazda.

To zjawisko jest dobrze widoczne na zdjęciach kwazarów wykonanych przez Kosmiczny teleskop Hubble'a. Można na nich rozróżnić światło samego kwazara oraz wokół niego słabą poświatę galaktyki, w której centrum znajduje się kwazar. Te zdjęcia wykonała moja żona, Sofia Kirhakos, we współpracy z kolegami, Johnem Bahcallem i Donem Schneiderem, więc z prawdziwą przyjemnością pokazuję je w tej książce (il. 16.3). W środku każdego zdjęcia znajduje się bardzo jasny punkt — to kwazar. Jest otoczony przez galaktykę (a w jednym przypadku przez dwie galaktyki — wydaje się, że się zderzają), widoczne są spiralne ramiona. Takie zdjęcia rozstrzygnęły kontrowersje dotyczące odległości: kwazary rzeczywiście znajdują się w takich odległościach, jakie sugeruje ich przesunięcie ku czerwieni (więc nie są jakimś dziwnym typem gwiazd w naszej własnej Galaktyce), a zatem są niewiarygodnie jasne.



ILUSTRACJA 16.3. Kwazary w centrach galaktyk. Zdjęcia wykonane Kosmicznym Teleskopem Hubble'a

Photo credit: J. Bahcall, M. Disney, NASA

Aby zrozumieć, na czym polega zjawisko kwazara, wróćmy do widma 3C 273. Jego linie emisyjne są szerokie, obejmują znaczny zakres długości fali, a przecież w rozdziale 6 dowiedzieliśmy się, że przejściom elektronowym w atomach odpowiada określona energia, a zatem i określona długość fali. W zjawisku poszerzenia linii emisyjnych kwazarów manifestuje się efekt Dopplera: wokół kwazara znajduje się gaz. Kwazar jako całość oddala się od nas z prędkością 16% prędkości światła, lecz względem tej ogólnej prędkości część gazu dodatkowo porusza się w naszym kierunku (przesuwając ku fioletowi część linii emisyjnej, względem środka linii), a inna część gazu oddala

się od nas (przesuwając jeszcze bardziej ku czerwieni część linii emisyjnej). W rezultacie obecność gazu powoduje poszerzenie linii emisyjnej. Wyobraź sobie emisję promieniowania przez gaz krążący po orbicie wokół masy, która znajduje się w centrum — w każdym punkcie wzdłuż kołowej orbity znajdują się cząstki gazu i każda z nich ma inną składową prędkości wzdłuż linii obserwacji, a zatem inne przesunięcie Dopplera. Poszerzenie linii emisyjnej odzwierciedla ten zakres przesunięć Dopplera.

Możemy uczynić jeszcze jeden krok dalej. Na podstawie szerokości linii emisyjnej można oceniać prędkość gazu — dla kwazarów typowa wartość wynosi 6 tysięcy kilometrów na sekundę. Coś powoduje, że gaz porusza się z tak ogromną prędkością. Postawimy hipotezę, że źródłem tej prędkości jest grawitacja; to znaczy, że gaz porusza się po orbicie wokół pewnego obiektu, którego fizyczną naturę chcielibyśmy zrozumieć.

Jaki jest promień tej orbity? Gdybyśmy znali promień, moglibyśmy wykorzystać prawa Newtona i prawa dotyczące ruchu po okręgu, aby obliczyć masę tego centralnego obiektu. Widzieliśmy już, że obrazy kwazarów są punktowe, przypominają gwiazdy, a zatem są za małe, aby nasze teleskopy mogły rozdzielić ich przestrzenną strukturę. Kluczem do określenia ich rozmiarów stało się odkrycie, że kwazary są zmienne; ich moc zmienia się znacząco w skali mniej więcej miesiąca.

Wyobraź sobie, że światło kwazara pochodzi z obszaru o średnicy jednego roku świetlnego. Światło, które biegnie do nas od przedniej strony kwazara (tej, która jest z przodu kwazara z naszego punktu widzenia), dotrze o rok wcześniej niż światło od tylnej strony. Nawet gdyby cała struktura w jakiś magiczny sposób nagle podwoiła swoją moc, nasze detektory rejestrowałyby stopniowy — trwający rok — wzrost jasności obserwowanej, gdyż najpierw dotarłoby do nas światło od przedniej strony kwazara, a dopiero rok później dotarłoby do nas światło od jego tylnej strony. Zatem fakt, że skala czasowa zmienności kwazarów wynosi około miesiąca, mówi nam, że ich rozmiary nie mogą być znacznie większe niż jeden miesiąc świetlny. A to jest zdumiewająco mały rozmiar — pamiętamy, że odległości gwiazd w naszej Drodze Mlecznej są mierzone w latach świetlnych, a objętość kwazara o średnicy miesiąca świetlnego (lub nawet mniej) emituje tyle energii co kilkaset zwykłych galaktyk.

Znamy już prędkość gazu krążącego wokół kwazara i wiemy, jak daleko jest ten gaz od tego czegoś, co znajduje się w środku i grawitacyjnie oddziałuje na gaz. Możemy wykonać takie same obliczenia, jakie wykonaliśmy w rozdziale 12, gdy wyznaczyliśmy masę Drogi Mlecznej z orbity Słońca wokół centrum Galaktyki: masa jest proporcjonalna do kwadratu prędkości pomnożonej przez promień. Gdy taki rachunek wykonamy dla kwazara, dostajemy zdumiewającą wartość 2×10^8 masy Słońca.

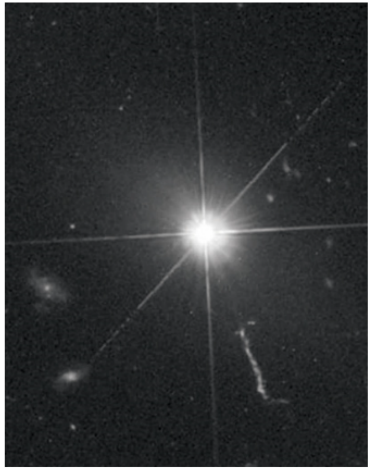
Podsumujmy: kwazary znajdują się w centrach galaktyk, ich średnice są rzędu jednego miesiąca świetlnego lub mniej, ich moc jest setki razy większa od mocy całej galaktyki, a masa setki milionów razy większa od masy Słońca. Olbrzymia masa w małej objętości — czyżby czarna dziura? Ale przecież czarne dziury mają być czarne — światło z nich nie ucieka — a kwazary należą

do najjaśniejszych obiektów we Wszechświecie. Co więcej, jedyny znany nam sposób, aby zrobić czarną dziurę, polega na kolapsie masywnej gwiazdy. Najcięższe znane nam gwiazdy mają masę około stu mas Słońca; nie da się w ten sposób zrobić czarnej dziury o masie 200 milionów mas Słońca. Co jest grane?

No cóż, czarne dziury mogą przybierać na masie. Wyobraźmy sobie gaz wpadający do czarnej dziury. Jeżeli biegnie na wprost, zostanie pochłonięty bez śladu, zwiększając masę czarnej dziury, ale poza tym bez żadnych efektów. Bardziej prawdopodobne jest jednak, że gaz ma niezerową transwersalną składową prędkości (niezerowy moment pędu względem czarnej dziury), czyli nie biegnie na wprost, lecz porusza się po orbicie wokół czarnej dziury. Przez analogię do gwiazd krążących po orbitach w Drodze Mlecznej przypuszczamy, że gaz tworzy spłaszczony, wirujący wokół czarnej dziury dysk. Grawitacja czarnej dziury jest bardzo silna, więc gaz znajdujący się bardzo blisko czarnej dziury porusza się z kolosalną prędkością — porównywalną lub nieco mniejszą od prędkości światła. Warstwy gazu krążą wokół czarnej dziury z różnymi prędkościami — im bliżej, tym szybciej — więc występuje między nimi tarcie. Na skutek tarcia gaz się rozgrzewa do temperatury setek milionów stopni. A jak już wielokrotnie widzieliśmy, gorące obiekty emitują promieniowanie.

A zatem sama czarna dziura jest niewidoczna, lecz krążący wokół niej gaz, zanim wpadnie do środka, może być niezwykle gorący i jasny. Kwazar to supermasywna czarna dziura otoczona przez dysk gazowej materii, świecący tak jasno, że przyćmiewa całą otaczającą go galaktykę. I rzeczywiście, to dzięki materii wpadającej do czarnej dziury w trakcie tego procesu stosunkowo mała czarna dziura, powstała zapewne z supernowej, może zwiększać swoją masę: krążący wokół niej dysk świeci, materia dysku stopniowo wpada do czarnej dziury, powiększając jej masę. Grawitacyjna energia kwazara jest zamieniana w energię kinetyczną gazu krążącego po spirali coraz bliżej grawitacyjnej studni czarnej dziury. Gdy w końcu gaz wpada do czarnej dziury, powiększa jej masę. Jest to tak zwany proces akrecji, który może działać przez setki milionów lat i tworzyć czarne dziury o masie milionów, a nawet miliardów mas Słońca.

Oprócz emisji fotonów ogromna energia dysku krążącego blisko czarnej dziury powoduje także emisję wysokoenergetycznych cząstek materii. Cząstki emitowane w płaszczyźnie dysku są wprawdzie blokowane przez sam dysk, lecz prostopadle do płaszczyzny dysku mogą tworzyć dżety (strumienie plazmy). Na kierunek i kształt dżetów może także wpływać potężne pole magnetyczne wokół kwazara. Taki wąski dżet jest widoczny w postaci słabej, cienkiej linii na godzinie piątej na zdjęciu kwazara 3C 273 wykonanym przez Kosmiczny Teleskop Hubble'a (il. 16.4). Ostre, proste linie wychodzące z samego kwazara są artefaktami optyki teleskopu.



ILUSTRACJA 16.4. Kwazar 3C 273 oraz jego dżet

Photo credit: Hubble Space Telescope, NASA

Takie dżety stanowią wizytówki czarnych dziur, do których wpada materia dysków. Eliptyczna galaktyka M87, która ma jedną z najbardziej masywnych czarnych dziur w naszym sąsiedztwie, o masie 3 miliardów mas Słońca, także emituje dżet o długości około 5 tysięcy lat świetlnych.

W powszechnej świadomości pokutuje popularny obraz czarnej dziury jako kosmicznego odkurzacza wciągającego wszystko, co znalazło się w pobliżu. Wyobraźmy sobie jednak, że jakimś magicznym sposobem nasze Słońce zamieni się jutro w czarną dziurę (o tej samej masie). Byłaby to oczywiście niedobra wiadomość, ponieważ Słońce przestałoby nam dostarczać światło oraz ciepło i Ziemia zamarzłaby. Ale orbita Ziemi pozostałaby niezmieniona. Moment pędu naszej planety w jej ruchu po orbicie wokół Słońca nie uległby zmianie i Ziemia nadal krążyłaby wokół Słońca, tak jak przez ostatnie 4,6 miliarda lat. I podobnie gwiazdy krążące po orbitach wokół czarnej dziury w centrum Drogi Mlecznej nie zostaną w najbliższej przyszłości połknięte przez tę czarną dziurę. Ta czarna dziura prawdopodobnie przeszła przez fazę kwazara w odległej przeszłości, gdy urosła do obecnej masy 4 milionów mas Słońca. Możemy zmierzyć jej masę, obserwując parametry orbit pojedynczych gwiazd krążących wokół niej, ale nie obserwujemy materii, która tworzyłaby dysk, więc nasza czarna dziura jest spokojna i nie świeci jako kwazar.

W naszym sąsiedztwie kwazary są rzadkością. Odległy o 2 miliardy lat świetlnych 3C 273 jest w istocie jednym z najbliższych jasnych kwazarów. Kwazary były bardziej rozpowszechnione we wczesnym Wszechświecie. Większość kwazarów charakteryzuje wysokie przesunięcie ku czerwieni, co oznacza, że są daleko. Ich światło podróżowało przez miliardy lat, zanim do nas dotarło, więc widzimy je w czasie, gdy Wszechświat był znacznie młodszy, niż jest teraz. Fakt, że liczba kwazarów we Wszechświecie zmieniła się w czasie, stanowi bezpośredni dowód, że Wszechświat ewoluuje, przecząc doskonałej zasadzie kosmologicznej Hoyle'a (zob. rozdział 15), który forsował koncepcję niezmiennego Wszechświata.

Znając liczbę kwazarów we wczesnym Wszechświecie, możemy przewidywać, że supermasywne czarne dziury we współczesnym Wszechświecie muszą być wszechobecne. W końcu czarne dziury tylko rosną i

nie znikają, gdy już raz powstaną (w rozdziale 20 zobaczymy, że dzięki efektom kwantowym czarne dziury mogą parować i ostatecznie znikają, lecz w przypadku supermasywnych czarnych dziur ten proces jest bardzo powolny — jest zaniedbywalny w skali miliardów lat, którą tutaj rozważamy). Fakt, że w sąsiednich galaktykach nie widzimy dzisiaj czarnych dziur świecących jako kwazary, mówi nam, że obecnie są one spokojne, pozbawione krążącego wokół i wpadającego do środka gazu. Supermasywna czarna dziura w centrum naszej Drogi Mlecznej, której obecność wywnioskowaliśmy z ruchów gwiazd w jej sąsiedztwie, stanowi tylko jeden z wielu takich przykładów.

Poszukiwanie czarnych dziur w centrum innych galaktyk stanowi poważne wyzwanie. Jeżeli czarna dziura nie będzie karmiona przez gaz wpadający z dysku akrecyjnego, nie będzie kwazarem, i nie zobaczymy żadnego promieniowania. Możemy jednak obserwować efekt Dopplera dla gwiazd znajdujących się w pobliżu centrum galaktyk i na tej podstawie wnioskować o obecności oddziałujących grawitacyjnie masywnych obiektów. Najłatwiej poszukiwać takich efektów w pobliskich galaktykach, dla których potrafimy dostrzec pojedyncze gwiazdy w centralnych obszarach, gdzie dominująca grawitacja czarnej dziury decyduje o ruchu gwiazd.

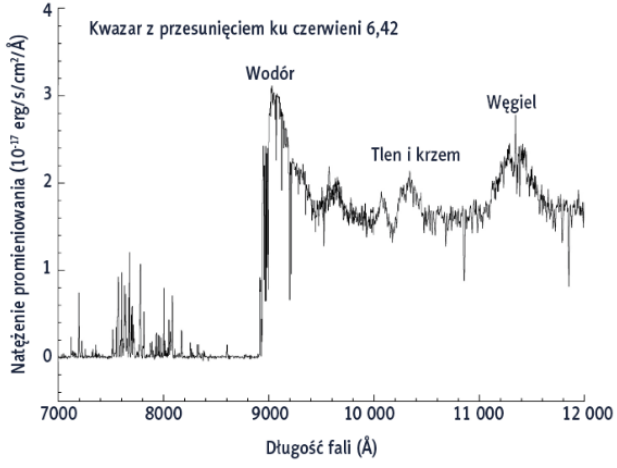
Astronomowie zbadali około stu galaktyk w poszukiwaniu czarnych dziur. Niemal w każdym przypadku, gdy dysponowali przyrządami o wystarczającej czułości, znaleźli dowody na istnienie czarnej dziury w centrum galaktyki. Na tyle, na ile potrafimy ocenić, niemal w każdej dużej galaktyce z dużym zgrubieniem (czyli w eliptycznych i w większości spiralnych) znajduje się czarna dziura. Nasza Droga Mleczna, z czarną dziurą o masie zaledwie 4 milionów mas Słońca, jest w zasadzie mięczakiem; najbardziej masywne czarne dziury wśród sąsiednich galaktyk mają masę kilku miliardów mas Słońca (jak widzieliśmy na przykładzie M87). Co więcej, im większa galaktyka eliptyczna (lub zgrubienie galaktyki spiralnej), tym bardziej masywna będzie czarna dziura; typowa masa czarnej dziury stanowi około jednej pięćsetnej masy zgrubienia składającego się z gwiazd, wśród których leży.

Dzięki kolosalnej jasności absolutnej kwazarów są one lepiej widoczne niż galaktyki. Jak daleko jest najbardziej oddalony kwazar, który obserwujemy? Przypomnijmy, że ze względu na skończoną prędkość światła promieniowanie kwazara, które rejestrujemy, zostało wyemitowane, gdy Wszechświat był znacznie młodszy, niż jest dzisiaj. Gdy spoglądamy na duże odległości w astronomii, patrzymy w przeszłość — nasze teleskopy są maszynami czasu.

W rozdziale 15 opisywałem program obserwacyjny Sloan Digital Sky Survey, który wykonał zdjęcia nieba, zmierzył przesunięcie ku czerwieni dwóch milionów galaktyk i zarejestrował widma ponad czterystu tysięcy kwazarów. Na podstawie tej próbki wiemy, że kwazary były najbardziej rozpowszechnione w okresie między drugim i trzecim miliardem lat po Wielkim Wybuchu. Wydaje się, że to wtedy supermasywne czarne dziury, znajdujące się dzisiaj w centrach dużych galaktyk, nagromadziły większość swojej masy. Dwa miliardy lat po Wielkim Wybuchu, czyli około 12 miliardów lat temu, odpowiada przesunięciu ku czerwieni równemu 3. Inaczej mówiąc, linie widmowe tych kwazarów mają długość fali 4 (czyli przesunięcie ku

czerwieni + 1) razy większe, niż miałyby, gdyby nie było ekspansji Wszechświata. W tym przypadku przesunięcie ku czerwieni nie jest niewielką poprawką, lecz dużym efektem!

Edwin Hubble odkrył liniową zależność między przesunięciem ku czerwieni i odległością galaktyk. Przy bardzo dużym przesunięciu ku czerwieni ta zależność jest nieco bardziej skomplikowana; okazuje się, że kwazar z przesunięciem ku czerwieni równym 3 znajduje się obecnie około 20 miliardów lat świetlnych od Ziemi. Jak to możliwe, skoro Wszechświat ma tylko 13,8 miliarda lat? Pamiętaj, że od czasu, gdy światło opuściło kwazar, Wszechświat powiększył się czterokrotnie (przesunięcie ku czerwieni + 1), unosząc kwazara na większą odległość, a te 20 miliardów lat świetlnych odpowiada jego obecnemu położeniu (mówimy tu o odległości w tak zwanych współrzędnych współporuszających się (ang. *comoving distance*).



ILUSTRACJA 16.5. Widmo kwazara SDSS J1148+5251 przy przesunięciu ku czerwieni 6,42. Ten kwazar, odkryty przez Michaela Straussa, Xiaohui Fana i ich kolegów w 2001 roku, od momentu odkrycia do 2011 roku miał najwyższe znane przesunięcie ku czerwieni. Jego promieniowanie, które obserwujemy dzisiaj, zostało wyemitowane, gdy Wszechświat miał mniej niż 900 milionów lat. Najsilniejsza linia (emisyjna) tego kwazara pochodząca od przejścia w wodorze (od stanu $n = 2$ do $n = 1$, zob. il. 6.2) uległa przesunięciu ku czerwieni od spoczynkowej (czyli zmierzonej w układzie odniesienia związanym ze źródłem emisji) długości fali 1216 angstremów do 9000 angstremów. Raptowny zanik widma poniżej 9000 angstremów stanowi rezultat absorpcji przez gazowy wodór pomiędzy kwazarem i nami

Credit: wykres wykonany przez Michaela A. Straussa na podstawie danych z: R.L. White i in., 2003, „Astrophysical Journal" 126: 1; A.J. Barth i in., 2003, „Astrophysical Journal Letters" 594: L95

Na ilustracji 16.5 widoczne jest widmo najdalszego kwazara, którego ja i moi koledzy znaleźliśmy na zdjęciach Sloan Digital Sky Survey. Bardzo silna linia emisyjna o długości fali 9000 Å (0,9 mikrona) odpowiada przejściu z drugiego poziomu energii na poziom podstawowy w wodorze — linia alfa Lymana. Na lewo od tej linii (w kierunku niebieskiego końca widma, czyli dla mniejszych długości fali) widmo spada do zera. Okazuje się, że wynika to z absorpcji przez gaz wodoru w przestrzeni między nami i kwazarem. To widmo zawiera linie emisyjne o długościach fali odpowiadających bliskiej podczerwieni i w zasadzie nie zawiera niczego o mniejszych długościach fali, co powoduje, że ten obiekt jest bardzo czerwony.

A zatem poszukiwanie kwazarów o największym przesunięciu ku czerwieni wydaje się proste: wśród zdjęć wykonanych przez Sloan Digital Sky Survey szukaj najbardziej czerwonych obiektów. Nie jest to jednak aż tak proste, ponieważ przegląd obejmuje zdjęcia około połowy miliarda obiektów. Musieliśmy się upewnić, że widoczny czerwony kolor danego obiektu nie wynika z jakiejś usterki w przetwarzaniu.

Jest jeszcze jedno wyzwanie. Z badań gwiazd wiemy, że im chłodniejsza gwiazda, tym bardziej jest czerwona. W 1998 roku, gdy pierwsze zdjęcia z Sloan Digital Sky Survey stały się dostępne, mój student, Xiaohui Fan, oraz ja zaczęliśmy program rejestrowania widm najbardziej czerwonych obiektów, które mogliśmy znaleźć wśród danych, aby potwierdzić, że są to kwazary, i zmierzyć ich przesunięcie ku czerwieni. Użyliśmy Apache Point Telescope (w tym samym obserwatorium, gdzie znajduje się teleskop Sloan Digital Sky Survey, w Sunspot w stanie Nowy Meksyk). Teleskop jest zdalnie sterowany przez Internet — zamiast latać przez cały kraj, mogliśmy zjeść w domu wczesną kolację, pojechać na kampus, skąd nadzorowaliśmy obserwacje, wysyłając na odległość 2 tysięcy mil instrukcje sterujące dla teleskopu.

Gdy zaczęliśmy mierzyć widma tych bardzo czerwonych obiektów, niemal natychmiast natrafiliśmy na żyłę złota, aczkolwiek w nieoczekiwanym miejscu. Wśród kwazarów o różnym przesunięciu ku czerwieni znaleźliśmy kilka spośród najchłodniejszych (a zatem o najmniejszej masie) znanych gwiazd w naszej własnej Drodze Mlecznej. Są to brązowe karły, opisane w rozdziale 8, o masie zbyt małej, aby mogły spalać wodór w swoim rdzeniu. Temperatura tych gwiazd wynosi 1000 K lub nawet mniej, a ich widma były dla nas czymś zupełnie nowym i nieznanym, gdy po raz pierwszy na nie natrafiliśmy. Pamiętam, jak o trzeciej nad ranem próbowałem odnaleźć nieliczne artykuły, które opisują takie gwiazdy, gdy mierzyliśmy ich widma i próbowaliśmy je zrozumieć. W ciągu jednej nocy mierzyliśmy widma obiektów gwiazdowych o najniższej znanej jasności absolutnej, w odległości zaledwie 30 lat świetlnych, oraz kwazarów o ogromnej mocy, położonych na granicy widzialnego Wszechświata. Była to najbardziej ekstremalna ilustracja faktu, że w astronomii samo zdjęcie nie daje żadnej percepcji głębi. Zarówno bardzo bliskie (w kategoriach astronomicznych), jak i niezmiernie daleko położone obiekty były reprezentowane jako słabe, czerwone punkty; wyglądały tak samo i do ich rozróżnienia niezbędna była szczegółowa analiza widm.

W miarę ulepszania techniki obróbki zdjęć i usuwania usterek na zdjęciach kontynuowaliśmy obserwacje coraz bardziej czerwonych obiektów. Kilkakrotnie złamaliśmy ówczesny rekord przesunięcia ku czerwieni kwazarów (gdy zaczęliśmy, wynosił 4,9). Za każdym kolejnym rekordem dzwoniliśmy do naszego kolegi, Jima Gunna (jednego z twórców projektu Sloan Digital Sky Survey, i zarazem pioniera badań kwazarów). Budząc go z głębokiego snu (zazwyczaj około trzeciej w nocy!), mówiliśmy: „Jim, znowu złamaliśmy rekord!", na co on odpowiadał: „Dobra robota, chłopcy. Dla takiej wiadomości zawsze chcę być budzony!", po czym zasypiał ponownie.

Linia alfa Lymana wodoru, widoczna w widmie naszego najdalszego obiektu na ilustracji 16.5, normalnie jest rejestrowana na długości fali 1216 Å; tutaj jest przesunięta ku czerwieni aż do 9000 Å, w zakresie bliskiej podczerwieni. Przesunięcie ku czerwieni wynosi (9000 Å – 1216 Å)/1216 Å, czyli 6,42, co odpowiada aktualnej odległości 28 miliardów lat świetlnych. Gdy go odkryliśmy w 2001 roku, był to kwazar o największym przesunięciu ku czerwieni. Niezależnie od tej ogromnej odległości zapewne jeszcze większe wrażenie robi fakt, że światło tego obiektu, które my obserwujemy dzisiaj, zostało wyemitowane mniej więcej 13 miliardów lat temu, gdy Wszechświat miał tylko około 850 milionów lat. Jeżeli promieniowanie CMB pochodzi z czasów, gdy Wszechświat był noworodkiem, to my obserwujemy go, gdy był brzdącem.

Tu pojawia się kolejna kosmiczna tajemnica. Jak wspomnieliśmy wcześniej, możemy wykorzystać widmo kwazara, aby oszacować masę czarnej dziury, która go napędza. Typowa wartość dla najbardziej odległych kwazarów wynosi około 4 miliardów mas Słońca, mniej więcej tyle samo co największe czarne dziury, które znamy w dzisiejszym Wszechświecie. Ale pamiętamy, że bardzo wczesny Wszechświat był niemal idealnie jednorodny, o czym świadczy jednorodność CMB. Skoro w tym pozbawionym struktury Wszechświecie powstały supermasywne czarne dziury, najgęstsze wyobrażalne obiekty, w ciągu zaledwie 850 milionów lat, to wcześniej musiała powstać pierwsza generacja gwiazd, które wybuchły jako supernowe, zostawiając po sobie czarne dziury o masie typowej dla gwiazd. Następnie te czarne dziury musiały w procesie akrecji pochłaniać materię w ogromnym tempie, aby osiągnąć tak ogromną masę w tak krótkim czasie. Teoretyczne modele sugerują, że nawet w idealnych warunkach jest to prawie niemożliwe, co sugeruje, że kwazary z tak wysokim przesunięciem ku czerwieni powinny być bardzo nieliczne. I rzeczywiście tak jest; po ponad dziesięciu latach poszukiwań znaleźliśmy tylko kilkadziesiąt kwazarów z największym przesunięciem ku czerwieni.

Poszukiwania najbardziej odległych kwazarów trwają. W 2011 roku nasz rekord został złamany w spektakularny sposób przez odkrycie kwazara z przesunięciem ku czerwieni równym 7,08, w ramach przeglądu, w którym zdołano zarejestrować większe długości fal (jeszcze dalej w zakresie podczerwonym) niż w Sloan Survey. Od momentu, gdy ten kwazar wyemitował światło, które my dziś obserwujemy, Wszechświat rozszerzył się o czynnik 8,08. Inne zespoły wykorzystują Kosmiczny Teleskop Hubble'a,

teleskop Subaru na Hawajach oraz inne teleskopy do poszukiwania galaktyk o jeszcze większym przesunięciu ku czerwieni. Nie jest jasne, czy modele formowania galaktyk i modele wzrostu czarnej dziury będą w stanie wyjaśnić te przyszłe odkrycia, jeżeli rekordy przesunięcia ku czerwieni będą nadal łamane. Przed nami interesujące czasy!

Astronomia ma tę cudowną cechę, że za każdym razem, gdy popatrzymy na niebo w nowy sposób, dokonujemy fundamentalnych i nieoczekiwanych odkryć. Dobrym przykładem jest projekt Sloan Digital Sky Survey, którego odkrycia omawialiśmy w tym rozdziale oraz w rozdziale 15. Obecnie jestem zaangażowany w planowanie jego następcy, Large Synoptic Survey Telescope (LSST — Duży Synoptyczny Teleskop Przeglądowy), który ma być umieszczony na szczycie góry w chilijskich Andach. Będzie miał większą zdolność zbierającą od teleskopu Sloan, a w ciągu trwającego dziesięć lat przeglądu będzie badał właściwości słabych galaktyk i kwazarów, rozkład ciemnej materii (na podstawie obserwacji galaktyk, których obrazy ulegają zniekształcaniu na skutek grawitacyjnego ogniskowania), odkryje setki tysięcy supernowych i innych przejściowych zjawisk. Teleskop sfilmuje czwartą część całego nieba: 860 kompletnych klatek w ciągu dziesięciu lat. Każdego dnia będzie generował 30 terabajtów danych, które my będziemy musieli przetworzyć. Powinien odkryć setki tysięcy obiektów z Pasa Kuipera i ostrzegać nas przed zbliżającymi się do Ziemi asteroidami. Ale najbardziej ekscytujące będą zapewne odkrycia, których jeszcze nie potrafimy sobie wyobrazić, „nieznane niewiadome” (ang. *unknown unknowns*) ze słynnej frazy Donalda Rumsfelda, sekretarza obrony USA w latach 2001-2006.

---

1 Połowę okręgu.

2 Chodzi oczywiście o mierzenie rozmiarów sfotografowanych obiektów widocznych na zdjęciach, a nie rozmiarów samych zdjęć.

3 Mly (ang. *million light years* lub *Mega light years*) — milion lat świetlnych; brak polskiego skrótu.

4 Ta historyczna granica została właśnie przekroczona przez sondę Gaia Europejskiej Agencji Kosmicznej, która aktualnie wykonuje pomiary paralaks gwiazd, co pozwoli wyznaczyć odległości gwiazd położonych dziesiątki tysięcy lat świetlnych od nas.

5 W tym rozumowaniu jest ukryte założenie, że prędkość oddalania się była stała w całym czasie.

6 Gra słów „Gravity sucks” może także oznaczać „Grawitacja jest do niczego”.

7 *Wimp* — mięczak; WIMP — akronim od Weakly Interacting Massive Particle — słabo oddziałująca masywna cząstka.

8 Próbnik Anizotropii Mikrofal.

Część III – Einstein i wszechświat

17 – Droga Einsteina do teorii względności

J. Richard Gott

Nazwisko Einsteina jest synonimem geniusza. Często zamiast „Hej, geniuszu, chodź no tutaj" mówimy „Hej, Einstein, chodź no tutaj"; a sformułowanie „to nie Einstein" oznacza „on nie jest geniuszem". Einstein był geniuszem. Newton także był geniuszem. Ale na świecie są i w historii świata byli także inni geniusze. Kto jest najwybitniejszym przedstawicielem literatury angielskiej? Szekspir! Na podstawie analizy jego dzieł Szekspir jest często wymieniany jako osoba o największym zasobie słów w historii światowej literatury. Jego dzieła obejmują słownik liczący 31 534 słowa. Statystyczna analiza dzieł Szekspira, wykonana przez Bradleya Efrona i Ronalda Thisteda sugeruje, że musiał on znać ponad 66 tysięcy słów. Szekspir pobiłby Newtona w ustnej części egzaminu SAT![1] Ale sądzę, że Newton pobiłby Szekspira w matematycznej części. Sądzę też, że Newton miewa przewagę nad Einsteinem, ponieważ oprócz swoich odkryć w dziedzinie grawitacji i optyki ma także ogromne zasługi w matematyce jako wynalazca rachunku różniczkowego i całkowego. Ale Newton miał także szczęście, gdyż urodził się we właściwym miejscu i we właściwym czasie — w Europie, wtedy gdy akurat te problemy były przedmiotem zainteresowania. Isaac Barrow, mentor i profesor Newtona w Cambridge, interesował się obliczeniami objętości beczek i tym podobnych obiektów — do tego rodzaju rachunków idealnie nadaje się rachunek całkowy. Świat dojrzał do odkrycia rachunku różniczkowego i całkowego. W istocie, Gottfried Wilhelm Leibniz, niemiecki filozof i matematyk, odkrył rachunek różniczkowy i całkowy niezależnie od Newtona. Jeżeli spojrzysz na mapę, to przekonasz się, że Newton i Leibniz żyli w Europie w odległości kilkuset mil (831 km) i dokonali swoich odkryć mniej więcej w tym samym czasie. To nie jest zwykły przypadek. W owym czasie te zagadnienia interesowały całą Europę.

Druga połowa XVII stulecia była erą wielkich odkryć. Wyniki obserwacji położeń planet, które na sześciuset stronach spisał Tycho Brahe, Kepler przekształcił w trzy proste prawa ruchów planet, sformułowane w języku matematyki. Jak opisał Michael w rozdziale 3, Newton wykorzystał trzecie prawo Keplera, aby wyprowadzić prawo grawitacji wraz z zależnością $1/r^2$. Na podobnej zasadzie w XX wieku doświadczalne wartości długości fali dla serii Balmera stanowiły podstawę wzoru opisującego poziomy energii w atomie wodoru i utorowały drogę do kwantowego opisu atomu, stworzonego przez Nielsa Bohra i Erwina Schrödingera.

Czasopismo „Time" wybrało Einsteina na najbardziej wpływową osobę XX wieku — „The Person of the Century" (Człowiek stulecia). Gutenberg, królowa

Elżbieta I, Thomas Jefferson i Thomas Edison zostali wybrani przez „Time" jako najbardziej wpływowe osoby w poprzednich stuleciach. Newton wyprzedził Szekspira w kategorii „The Person of the Seventeenth Century" (Człowiek Siedemnastego Stulecia).

W Trinity College w Cambridge stoi piękna, naturalnej wielkości statua Newtona. William Wordsworth napisał o niej wiersz, nazywając ją:

> The marble index of a mind forever
> Voyaging through strange seas of Thought, alone[2].

Łacińska sentencja na pomniku brzmi: *Newton Qui genus humanum ingenio superavit*, co można przetłumaczyć jako „Newton, którego geniusz przewyższył ludzki rodzaj". Dla tych z nas, którzy — podobnie jak Neil — uważają Newtona za najmądrzejszego przedstawiciela ludzkości, wykute w marmurze słowa stanowią jeszcze jedno potwierdzenie. Einstein ma znacznie większych rozmiarów pomnik usytuowany przed frontem Narodowej Akademii Nauk w Waszyngtonie, w pobliżu Vietnam Veterans Memorial. Nawet w pozycji siedzącej figura Einsteina mierzy 3,5 metra. Dzieci bawią się na jego kolanach.

Zostawmy pomniki i porównajmy dokonania Einsteina i Newtona. Nie zamierzam kwestionować opinii Neila, zgodnie z którą Newton jest największym uczonym wszech czasów. Uznaję zasługi Newtona, lecz zamierzam wykazać, że Einstein jest kimś, kto gra w tej samej lidze co Newton i może walczyć o ten tytuł.

Jaki jest najsłynniejszy wzór Newtona?

$$F = ma.$$

Jaki jest najsłynniejszy wzór Einsteina?

$$E = mc^2.$$

Który z tych wzorów jest bardziej znany? Wzór Newtona, który omawialiśmy szczegółowo w rozdziale 3, mówi, że im bardziej masywny obiekt, tym trudniej go przyspieszyć. Bardzo ważne dla dynamiki, lecz poza tym proste. Trudniej poruszyć fortepian niż harmonię. Wzór Einsteina mówi, że maleńki kawałek materii można przekształcić w olbrzymią ilość energii. W tym wzorze kryje się tajemnica bomby atomowej oraz mechanizm, dzięki któremu Słońce świeci. Który z tych dwóch wzorów wydaje ci się ważniejszy?

Newton ma inne słynne równanie: $F = GmM/r^2$, które określa siłę działającą między dwoma ciałami o masie m i M. To bardzo ważne. Einstein także ma drugi słynny wzór: $E = h\nu$, który mówi, że światło istnieje w postaci cząstek energii zwanych fotonami, każdy o energii równej stałej Plancka h pomnożonej przez częstotliwość ν. Należy przyznać, iż Newton sądził, że światło składa się z cząstek, ale należy także uznać, że Einstein to udowodnił. Światło ma zarówno charakter falowy, jak i cząstkowy, co ma kluczowe znaczenie w mechanice kwantowej.

Obaj panowie byli także wynalazcami. Newton wynalazł teleskop zwierciadlany. Wszystkie dzisiejsze teleskopy to teleskopy zwierciadlane.

Kosmiczny Teleskop Hubble'a, teleskopy Kecka to teleskopy zwierciadlane. Einstein odkrył zasadę działania lasera. Za każdym razem, gdy słuchasz płyty CD lub DVD, korzystasz z odkrycia Einsteina. Obaj panowie pracowali dla rządu w swoich krajach. Newton pełnił funkcję mistrza królewskiej mennicy (Master of the Royal Mint). Wynalazł frezowanie krawędzi monet, które stosujemy do dzisiaj. Frez zapobiega fałszowaniu monet przez oszustów, którzy zeskrobywali krawędzie srebrnych monet i puszczali je w obieg jako pełnowartościowe. Monetę, której zeskrobano frez, łatwo odróżnić i zidentyfikować. Za każdym razem, gdy trzymasz w ręce jakąś monetę, widzisz wpływ Newtona. Rola Einsteina w dziejach świata jest dobrze znana — napisał kluczowy list do prezydenta Franklina D. Roosevelta, co doprowadziło do utworzenia projektu Manhattan, powstania bomb atomowych, które zakończyły drugą wojnę światową. Do dzisiaj mamy do czynienia ze skutkami tego, czego Einstein wówczas dokonał.

Einstein był tak sławny, że ludzie uwielbiali opowiadać o nim anegdoty, które jeszcze bardziej przyczyniały się do jego sławy. Jedna z anegdot (zapewne apokryf) brzmi następująco: Einstein rozmawia z kimś w Institute of Advanced Study. Nagle ten osobnik wyciąga z kieszeni notes i coś w nim zapisuje. Einstein pyta: „Co tam piszesz?", na co pada odpowiedź: „Och, to mój notes. Noszę go wszędzie ze sobą, bo gdy mi przyjdzie do głowy jakiś dobry pomysł, to mogę go zanotować, aby nie zapomnieć". Na to Einstein: „Nigdy nie potrzebowałem takiego notesu, bo miałem tylko trzy dobre pomysły". Jakie to były pomysły i jak Einstein na nie wpadł?

Pierwszy pomysł to szczególna teoria względności, z której wynika $E = mc^2$. Drugi to efekt fotoelektryczny, za który Einstein otrzymał nagrodę Nobla z fizyki w 1921 roku. A trzeci to ogólna teoria względności — teoria zakrzywionej czasoprzestrzeni, która wyjaśnia grawitację. Na podstawie równań swojej teorii Einstein przewidział, że światło ulegnie ugięciu w zakrzywionej przestrzeni w pobliżu Słońca, a także obliczył kąt tego ugięcia. Gwiazdy obserwowane w pobliżu Słońca w trakcie zaćmienia Słońca powinny się znajdować w lekko przesuniętych położeniach w stosunku do zdjęć wykonanych kilka miesięcy wcześniej, gdy Słońce nie znajdowało się w pobliżu tych gwiazd. Przewidziany przez Einsteina kąt ugięcia (1,75 sekundy kątowej dla gwiazd widocznych na krawędzi Słońca) był dwukrotnie większy od kąta, który przewidziałby Newton na podstawie swojej teorii dla cząstek podróżujących z prędkością światła. Brytyjska ekspedycja pod kierownictwem Sir Arthura Eddingtona zmierzyła kąt ugięcia i potwierdziła przewidywania Einsteina. Dzisiaj teorię Einsteina uważamy za poprawną, a teorię światła Newtona za błędną. Zatrzymajmy się na chwilę, aby to docenić!

Pod koniec XX wieku widziałem w telewizji program o największych osiągnięciach sportowych: Jesse Owens wygrywa bieg na 100 metrów na olimpiadzie w Berlinie; Secretariat wygrywa Belmont Stakes z przewagą 31 długości, kompletując Triple Crown; Mohammed Ali nokautuje George'a Foremana w Zairze, odzyskując tytuł mistrza wagi superciężkiej w boksie. Na czym polegała najważniejsza gra w dwudziestowiecznej nauce? Wyobraź sobie Newtona i Einsteina na boisku do koszykówki. Newton ma piłkę. Kozłuje

przez całe boisko, ale nie jest to zwykła piłka; to jest teoria grawitacji — jego największe osiągnięcie! Nadbiega Einstein, odbiera Newtonowi piłkę, rzuca... i piłka wpada do kosza! To była najważniejsza gra w dwudziestowiecznej nauce.

Chciałbym wyjaśnić, w jaki sposób Einstein wpadł na swoje wielkie idee i dokonał wielkich odkryć. Einstein był dobrym uczniem. Miał dobre stopnie z nauk ścisłych. Jeżeli słyszałeś historie o jego słabych stopniach — zapomnij o nich. Einstein zainteresował się nauką w wieku czterech lat, gdy ojciec pokazał mu kompas. Od dziecięcej fascynacji kompasem zaczęła się kariera naukowa. Einstein samodzielnie opanował rachunek różniczkowy i całkowy, gdy miał dwanaście lat. Bystry chłopak. Gdy miał szesnaście lat, rozmyślał o najbardziej ekscytującej ówczesnej teorii — teorii elektromagnetyzmu Maxwella. Maxwell połączył wszystkie prawa elektryczności i magnetyzmu w jednej teorii elektromagnetyzmu.

W przyrodzie istnieją dodatnie i ujemne ładunki elektryczne. Ładunki o przeciwnych znakach przyciągają się, a ładunki o jednakowych znakach odpychają się z siłą zmieniającą się z odległością jak $1/r^2$. Dwa dodatnie ładunki odpychają się, dwa ujemne ładunki odpychają się, natomiast ładunek dodatni i ujemny przyciągają się. Tak mówi prawo Coulomba, które rządzi elektrostatyką. Ładunki wytwarzają wokół siebie pole elektryczne. Jeżeli jesteś ładunkiem, to pole elektryczne działa na ciebie i generuje twoje przyspieszenie. Pole elektryczne jest odpowiedzialne za tę proporcjonalną do $1/r^2$ siłę, a także za wszystkie elektrostatyczne zjawiska, które obserwujemy niekiedy w zimie na odzieży. Ruchome ładunki wytwarzają także pole magnetyczne. Jeżeli jesteś nieruchomym ładunkiem, to pole magnetyczne nie działa na ciebie, ale jeżeli jesteś poruszającym się ładunkiem, to pole magnetyczne działa na ciebie siłą magnetyczną. Wszystkimi tymi zjawiskami rządzą prawa elektromagnetyzmu. Prawo Ampère'a mówi, w jaki sposób poruszające się ładunki (na przykład prąd w kablu) wytwarzają pole magnetyczne. Jeżeli znasz pole magnetyczne oraz pole elektryczne w jakimś punkcie, możesz obliczyć siłę elektryczną i magnetyczną, która działa na ładunek znajdujący się w tym punkcie. Prawo Faradaya opisuje, w jaki sposób zmienne pole magnetyczne wytwarza pole elektryczne. W przyrodzie nie istnieją „ładunki magnetyczne" — nie istnieje pojedynczy magnetyczny biegun północny (lub południowy), wokół którego rozchodziłoby się pole magnetyczne. Prawo zachowania ładunku mówi, że całkowita liczba ładunków (czyli liczba dodatnich ładunków minus liczba ujemnych ładunków) jest stała. Jeżeli na przykład w jakimś obszarze znajduje się 10 dodatnich ładunków i 9 ujemnych ładunków, to całkowity ładunek wynosi +1. Dodatni i ujemny ładunek mogą się połączyć i wzajemnie wyeliminować, pozostawiając 9 dodatnich ładunków i 8 ujemnych ładunków, ale całkowity ładunek nadal wynosi +1.

Maxwell przeanalizował znane wówczas prawa elektromagnetyzmu i odkrył, że nie są one spójne z zasadą zachowania ładunku. Aby były spójne, musi być uwzględniony jeszcze jeden efekt: zmienne pole elektryczne musi wytwarzać pole magnetyczne. Maxwell połączył wszystkie powyższe prawa w

zestaw czterech równań — w równania Maxwella (czasem można te równania zobaczyć na T-shirtach noszonych przez studentów fizyki).

W równaniach Maxwella występuje pewna stała c, która określa stosunek siły elektrycznej do magnetycznej. Jeżeli ładunki elektryczne poruszają się względem siebie z prędkością v, to stosunek siły magnetycznej do elektrycznej jest w przybliżeniu równy v^2/c^2 (c ma wymiar prędkości). Na podstawie dostępnych wówczas danych eksperymentalnych Maxwell oszacował wartość stałej c i otrzymał bardzo wysoki wynik c = 310 740 km/s.

Maxwell odkrył interesujące rozwiązanie swoich równań w postaci fali elektromagnetycznej biegnącej w pustej przestrzeni z prędkością c. Oba pola — magnetyczne i elektryczne — są prostopadłe do wektora prędkości tej fali. Fala jest sinusoidalna, a pola magnetyczne i elektryczne oscylują w każdym punkcie trajektorii fali (podobnie jak korek na wierzchołku fali morskiej). Wzdłuż kierunku propagacji fali oscylujące pole elektryczne wytwarza pole magnetyczne, a oscylujące pole magnetyczne wytwarza pole elektryczne. Każdy wierzchołek fali porusza się z prędkością c = 310 740 km/s.

Eureka! Maxwell uświadomił sobie, że stała c jest równa prędkości światła! Światło musi być falą elektromagnetyczną! Był to jeden z wielkich momentów w nauce. A skąd Maxwell znał wartość prędkości światła? Ponieważ astronomowie — w tym miejscu mówię w imieniu astronomów — zmierzyli prędkość światła! W 1676 roku duński astronom, Ole Rømer, zauważył, że kolejne, następujące po sobie zaćmienia księżyca Io przez Jowisza następują nieco częściej, gdy Ziemia zbliża się do Jowisza, a gdy Ziemia oddala się od Jowisza, odstępy czasowe pomiędzy kolejnymi zaćmieniami Io są nieco większe. Patrząc na Jowisza oraz na krążące wokół niego księżyce, widzimy swego rodzaju gigantyczny, astronomiczny zegar. Gdy Ziemia zbliża się do Jowisza, ów zegar spieszy, gdy natomiast Ziemia oddala się od Jowisza, zegar się spóźnia. Rømer zinterpretował (poprawnie) tę nieregularność jako konsekwencję skończonej prędkości światła. Gdy Ziemia zbliża się do Jowisza, odległość między nimi się zmniejsza, promienie światła wysyłane przez Io przy kolejnych zaćmieniach mają coraz mniejszą odległość do pokonania i docierają do celu nieco wcześniej. Jest to zjawisko podobne do efektu Dopplera — wiązki światła z kolejnych zaćmień trafiają częściej do detektora. Rømer wydedukował, że światło potrzebuje około jedenastu minut, aby pokonać odległość równą połowie średnicy orbity Ziemi wokół Słońca. Otrzymany przez niego wynik jest nieco większy od aktualnej wartości wynoszącej osiem minut. Gdy Ziemia jest najbliżej Jowisza, astronomiczny zegar Io spieszy około ośmiu minut, gdy Ziemia jest najdalej od Jowisza, zegar Io spóźnia się o osiem minut. W rozdziale 8 opisaliśmy jak w 1672 roku Giovanni Cassini zmierzył paralaksę Marsa i na tej podstawie wyznaczył promień orbity Ziemi. Korzystając z wyników Rømera i znając rozmiary orbity Ziemi, Christiaan Huygens oszacował prędkość światła i otrzymał wynik 220 000 km/s (tylko około 27% mniejszy od aktualnej wartości 299 792 km/s).

W 1728 inny astronom, James Bradley, użył innej metody, aby zmierzyć prędkość światła. Wyobraź sobie gwiazdę, która znajduje się wprost nad twoją

głową. Jej światło pada na ciebie pionowo, jak krople deszczu w bezwietrzny dzień. Jeżeli jednak jedziesz samochodem, deszcz pada pod kątem na szyby, ponieważ się poruszasz. Ziemia porusza się z prędkością 30 km/s na swej orbicie wokół Słońca, więc jeżeli wycelujesz swój teleskop pionowo w górę, światło wpadające przez obiektyw nie dotrze do okularu, lecz trafi w boczną ścianę teleskopu — ponieważ się poruszasz wraz z Ziemią. Chcąc zobaczyć gwiazdę, będziesz musiał nieco przechylić teleskop, aby dopasować nachylenie teleskopu do kąta padania deszczu (promieni światła) na twój pojazd (Ziemię). Jak mocno przechylić? Około 20 sekund kątowych. Gdy tę samą gwiazdę będziesz obserwował sześć miesięcy później, będzie przesunięta o 20 sekund kątowych w przeciwną stronę. Bradley zdołał zmierzyć ten efekt, zwany aberracją gwiezdną. Zmierzone nachylenie, równe $v_{\text{Ziemia}}/v_{\text{światło}}$, wynosiło około 1/10 000. W ten sposób Bradley wydedukował, że prędkość światła jest około 10 tysięcy razy większa od orbitalnej prędkości Ziemi wynoszącej 30 km/s, a zatem $c = 300\,000$ km/s. Gdy w 1865 roku Maxwell wyliczył, że jego biegnąca w pustej przestrzeni elektromagnetyczna fala porusza się z prędkością 310 740 km/s, zauważył zbieżność tych dwóch liczb. Biorąc pod uwagę dokładność swojego wyniku (wynikającą z dokładności pomiarów sił elektrycznych i magnetycznych) oraz dokładność obserwacji astronomicznych, uznał, że światło jest falą elektromagnetyczną. Maxwell zdawał sobie sprawę, że fale elektromagnetyczne mogą mieć długość fali znacznie większą lub znacznie mniejszą od długości fali w zakresie widzialnym. Dzisiaj znamy krótsze fale — ultrafioletowe, promienie X, promienie gamma — natomiast dłuższe są znane jako podczerwone, mikrofale i fale radiowe. W 1886 roku Heinrich Hertz wykonał eksperyment, w którym przesłał fale radiowe z jednego końca laboratorium do drugiego, co stanowiło ostateczne potwierdzenie hipotezy Maxwella. W czasach Einsteina teoria Maxwella była najbardziej ekscytującą i zarazem najnowszą teorią fizyczną.

W 1896 roku Einstein, gdy miał zaledwie siedemnaście lat, wykonał pewien eksperyment myślowy. Wyobraził sobie, że w samo południe wyrusza w podróż i oddala się od miejskiego zegara z prędkością światła. Gdy spoglądał do tyłu, widział, że zegar nadal wskazuje południe, ponieważ światło, które pokazuje południe na zegarze, cały czas porusza się wraz z nim. Czy czas w jakiś sposób zatrzymuje się, gdy poruszasz się z prędkością światła? Einstein wyobrażał sobie, jak wyglądałby promień światła, który porusza się wraz z nim. Widziałby statyczne fale pola elektrycznego i magnetycznego jak bruzdy na zaoranym polu. Fale nie poruszałyby się względem niego, ponieważ biegłyby w tym samym kierunku z tą samą prędkością. Taka stacjonarna konfiguracja pola elektrycznego i magnetycznego nie jest jednak dopuszczalna przez falowe równania Maxwella. Wydawało się, że to, co obserwowałby przez okno swojego wyimaginowanego pojazdu kosmicznego, nie byłoby jednak możliwe. Einstein wywnioskował, że za tym paradoksem kryje się jakiś błąd. Rozwiązanie tego problemu zajęło mu dziewięć lat.

Znalezione w 1905 roku rozwiązanie było bardzo oryginalne. Einstein przyjął dwa postulaty:

1. Ruch jest względny. Prawa fizyki są takie same we wszystkich inercjalnych układach odniesienia, czyli dla każdego obserwatora poruszającego się ruchem jednostajnym (ze stałą prędkością bez zmiany kierunku).

2. Prędkość światła w pustej przestrzeni jest stała. Prędkość światła zmierzona przez dowolnego obserwatora poruszającego się ruchem jednostajnym nie zależy od prędkości obserwatora, czyli jest taka sama we wszystkich inercjalnych układach odniesienia.

Te dwa postulaty stanowią podstawę szczególnej teorii względności Einsteina. Jest to teoria względności, ponieważ ruch jest względny (postulat pierwszy), i jest szczególna, aby odróżnić ją od uogólniającej ją teorii względności Einsteina, nazywanej przez niego ogólną teorią względności. Pierwszy postulat sam wielokrotnie testowałeś. Czy siedziałeś kiedyś w samolocie lecącym z prędkością 800 kilometrów na godzinę (wzdłuż prostej, bez zakrętów), z zasłoniętymi oknami (żeby pasażerowie mogli oglądać jakiś kiepski film)? Siedząc w tym ciasnym fotelu, masz wrażenie, że wcale się nie poruszasz. Nie odczuwasz ruchu samolotu. W tej chwili wraz z Ziemią krążymy wokół Słońca z prędkością 30 km/s, ale wydaje nam się, że nic się nie porusza. Pierwszy postulat stanowi zasadę względności: istotne są tylko względne ruchy; nie da się zdefiniować absolutnego standardu spoczynku. Prawo grawitacji Newtona spełnia tę zasadę. Mówi ono, że przyspieszenie (zmiana prędkości) dwóch ciał zależy od ich odległości, ale nie zależy od ich prędkości. Układ Słoneczny funkcjonowałby tak samo, gdyby Słońce było nieruchome, a planety krążyłyby wokół niego, albo gdyby cały Układ poruszał się z prędkością 100 000 km/s. Dla Newtona to bez znaczenia. Żaden grawitacyjny eksperyment nie jest w stanie rozstrzygnąć, czy Układ Słoneczny się porusza czy nie. W istocie, porusza się wokół centrum Galaktyki z prędkością około 220 km/s. Teoria Newtona spełnia pierwszy postulat. Einstein sądził, że równania Maxwella także powinny spełniać ten postulat. Wszystkie prawa fizyki powinny spełniać ten postulat.

Drugi postulat jest dość szczególny. Jeżeli promień światła biegnie w moją stronę, a ja zmierzę prędkość tego światła, to wyjdzie wynik 300 000 km/s. Jeżeli obok mnie przebiegnie ktoś poruszający się z prędkością 100 000 km/s względem mnie i zmierzy prędkość tego samego światła, to nie wyjdzie mu 200 000 km/s, jak mógłbyś podejrzewać. Wyjdzie mu 300 000 km/s, tak jak mnie. To szaleństwo!

Zdrowy rozsądek podpowiada, że prędkości się dodają. W gruncie rzeczy ten postulat mógłby być spełniony, gdyby zegary tego szybkonogiego osobnika tykały w innym tempie niż moje, albo gdyby jego pomiary odległości dawały inne wyniki niż moje. Einstein postąpił wbrew zdrowemu rozsądkowi i przyjął owe dwa postulaty. Gdyby to była partia szachów, nazwałbym to posunięcie „ruchem geniusza” (oznaczonym w taki sposób: !!), posunięciem, które prowadzi do mata siedemnaście ruchów później. Einstein założył, że jego dwa postulaty są poprawne, udowodnił pewne twierdzenia oparte na eksperymentach myślowych wynikających z postulatów, a następnie sprawdzał, co z tego wszystkiego wynika. Jeżeli twierdzenia zgadzały się z

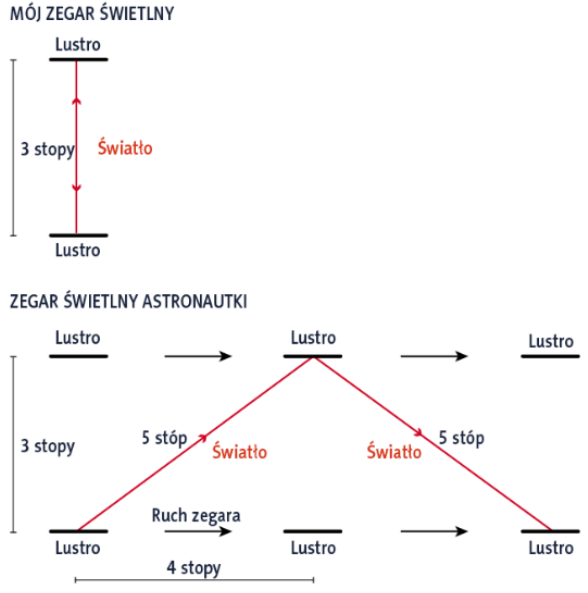
wynikami obserwacji, to stanowiły dowód na rzecz poprawności postulatów. To było niesamowite. Nikt wcześniej nie próbował czegoś podobnego. Postulaty Einsteina były falsyfikowalne[3]. Gdyby twierdzenia nie zgadzały się z wynikami obserwacji, jego teoria byłaby błędna. Jeżeli twierdzenia zgadzały się z wynikami obserwacji, to nie stanowiły wprawdzie formalnych dowodów, ale stanowiły poważne przesłanki na rzecz poprawności postulatów.

Dlaczego Einstein wierzył w drugi postulat? Ponieważ prędkość światła była stałą w równaniach Maxwella związaną ze stosunkiem siły magnetycznej do siły elektrycznej. Obie siły można zmierzyć w laboratorium. Maxwell obliczył, że fale świetlne poruszają się w pustej przestrzeni z prędkością około 300 000 km/s. Gdybyś zobaczył promień światła mijający cię z jakąś inną prędkością, na przykład 200 000 km/s, mógłbyś wydedukować, że poruszasz się z prędkością 100 000 km/s. Mógłbyś wydedukować, że sam się poruszasz, a to naruszałoby pierwszy postulat. W 1887 roku Albert Michelson i Edward Morley przeprowadzili słynny eksperyment, w którym próbowali zmierzyć prędkość Ziemi w jej ruchu wokół Słońca. Eksperyment polegał na odbijaniu wiązek światła od luster w laboratorium w taki sposób, aby zmierzyć różnice prędkości światła względem laboratorium dla wiązek światła poruszających się równolegle i prostopadle do kierunku ruchu Ziemi. Dokładność ich pomiarów była wystarczająca, aby zarejestrować prędkość 30 km/s, z jaką Ziemia się porusza wokół Słońca. Wynik pomiarów był niesamowity — wynosił zero, tak jakby Ziemia była nieruchoma, a wiązki światła poruszały się we wszystkich kierunkach z jednakową prędkością względem laboratorium. A my przecież wiemy, że Ziemia się porusza — obserwujemy aberrację gwiezdną. Dla Michelsona i Morleya to była poważna zagadka, ale ich rezultat był dokładnie taki, jak przewiduje drugi postulat Einsteina. Prędkość światła jest zawsze taka sama, niezależnie od tego, czy Ziemia się porusza czy nie. Jeżeli akceptujesz drugi postulat, to wiesz, że Michelson i Morley dostaną wynik równy zeru.

Tak więc Einstein założył, że jego dwa postulaty są poprawne, a następnie sformułował pewne twierdzenia oparte na tych postulatach. Oto jedno z takich twierdzeń: nie da się zbudować rakiety, która podróżuje z prędkością większą od prędkości światła. Dlaczego? Przypuśćmy, że poświecę laserem w ścianę w moim salonie; siedzę i widzę plamkę światła na ścianie. Ale jeżeli zbudujesz rakietę, która podróżuje z prędkością większą od prędkości światła i spróbujesz wykonać w niej taki sam eksperyment, to wynik będzie inny. Przypuśćmy, że poświecisz laserem w przednią ścianę w kabinie twojej rakiety — światło nigdy nie dotrze do ściany. Każdy sportowiec powie ci, że nie możesz dogonić biegacza, który jest szybszy od ciebie i wcześniej wystartował. Wiązka światła z lasera nie dotrze do przedniej ściany, ponieważ przód rakiety porusza się szybciej (szybciej niż światło) i wystartował wcześniej. Gdybyś wykonał ten eksperyment w rakiecie, wiązka laserowa nigdy nie dotarłaby do przedniej ściany rakiety, a ty wiedziałbyś, że się poruszasz (i to szybciej od światła). Chwileczkę — to nie jest dozwolone przez pierwszy postulat. Skoro poruszasz się ruchem jednostajnym bez zakrętów, nie możesz stwierdzić, że się poruszasz. Musisz uzyskać taki sam wynik, jaki ja

uzyskałem w moim salonie. Wynika stąd, że nie możesz zbudować rakiety, która podróżuje z prędkością większą od prędkości światła. Dziwne twierdzenie, ale jeżeli wierzysz w dwa postulaty Einsteina, musisz wierzyć także i w to twierdzenie. Jeżeli poruszasz się wolniej od światła, wiązka lasera w końcu dotrze do przedniej ściany rakiety. To może dość długo potrwać, jeżeli na przykład twoje zegary wolno tykają, ale w końcu dotrze. Podróżowanie wolniej od światła jest w porządku, ale nie możesz zbudować rakiety, która podróżuje z prędkością większą od prędkości światła. Przetestowaliśmy to twierdzenie w akceleratorach, gdzie rozpędzamy takie cząstki jak elektrony i protony do coraz większej prędkości, coraz bliżej prędkości światła, ale nigdy jej nie osiągnęliśmy.

A oto jeszcze jedno twierdzenie. Wyobraź sobie „świetlny zegar", w którym wiązka światła odbija się między dwoma lustrami. Jedno lustro może być na suficie, a drugie na podłodze. Każde odbicie reprezentuje jedno tyknięcie zegara. Światło porusza się z prędkością 300 000 km/s, czyli około jednej stopy na nanosekundę. Nanosekunda to jedna miliardowa część sekundy. Jeżeli zbliżymy lustra na odległość około trzech stóp, to zegar będzie tykał co 3 nanosekundy (il. 17.1).



ILUSTRACJA 17.1. Zegary świetlne. Mój zegar świetlny tyka co 3 nanosekundy. Identyczny zegar ma astronautka poruszająca się z prędkością 80% prędkości światła względem mnie. Światło porusza się ze stałą prędkością jednej stopy na nanosekundę. Ja widzę, jak wiązki światła w zegarze astronautki przemierzają diagonalne odcinki, długie na 5 stóp, a zatem widzę, że zegar astronautki tyka co 5 nanosekund

Credit: J. Richard Gott, *Time Travel in Einstein's Universe*, Houghton Mifflin, 2001

To taki sam zegar, jaki miał pradziadek, tylko szybciej tyka. Wiązka światła odbija się w górę i w dół, w górę i w dół, między dwoma lustrami. Co 3 nanosekundy trafia w jedno z luster. To jest mój świetlny zegar. A teraz

wyobraźmy sobie astronautkę, która ma podobny zegar świetlny (il. 17.1) i która mija mnie, poruszając się od lewej do prawej z prędkością równą 80% prędkości światła. To mniej niż prędkość światła, więc może się tak poruszać. Z jej punktu widzenia wiązka światła odbija się pionowo, w górę i w dół, więc jej zegar tyka co 3 nanosekundy. Ale jeżeli ja spojrzę przez okno jej rakiety, to zobaczę jej zegar poruszający się z prędkością równą 80% prędkości światła, a jej wiązkę światła poruszającą się wzdłuż diagonalnych odcinków. Wiązka startuje od dolnego lustra, w czasie 3 nanosekund pokonuje w pionie 3 stopy, ale w tym samym czasie górne lustro przemieściło się od lewej do prawej o 4 stopy, więc wiązka przebiegła diagonalny odcinek o długości 5 stóp. Mamy tu pitagorejski trójkąt prostokątny 3-4-5, o bokach o długości 3 stóp pionowo, 4 stóp poziomo oraz 5 stóp wzdłuż przeciwprostokątnej. Długości spełniają twierdzenie Pitagorasa $3^2 + 4^2 = 5^2$. Względem mnie wiązka światła przebiegnie 5 stóp od lewego dolnego do prawego górnego narożnika trójkąta, natomiast astronautka w tym czasie przemieści się o 4 stopy od lewej do prawej strony. Zatem porusza się z prędkością równą 4/5, czyli 80% prędkości światła względem mnie. Ja widzę, że wiązka światła przemieszcza się o jedną stopę w czasie jednej nanosekundy (zgodnie z drugim postulatem), więc muszę stwierdzić, że potrzebuje ona 5 nanosekund, aby przebiec 5 stóp od lewego dolnego do prawego górnego narożnika. Muszę także stwierdzić, że kolejne 5 nanosekund zajmie jej pokonanie drugiego diagonalnego odcinka od górnego do dolnego lustra (które w międzyczasie przemieściło się o 8 stóp w prawo). W rezultacie muszę stwierdzić, że jej zegar tyka co 5 nanosekund, a nie co 3 nanosekundy. Muszę stwierdzić, że jej zegar idzie wolniej (o czynnik 3/5 wolniej niż mój).

A teraz kilka interesujących konkluzji. Muszę stwierdzić, że tętno astronautki jest wolniejsze (o czynnik 3/5 wolniejsze niż moje). W przeciwnym razie ona musiałaby zauważyć, że jej zegar idzie wolniej niż bije jej serce, z czego wywnioskowałaby, że się porusza, co byłoby sprzeczne z pierwszym postulatem. Każdy zegar na pokładzie jej rakiety musi wolniej tykać, o czynnik 3/5. W przeciwnym razie ona musiałaby zauważyć, że się porusza. Jeżeli na pokładzie jej rakiety są miony (nietrwałe, cięższe od elektronu cząstki elementarne), które się rozpadają, to muszą rozpadać się wolniej. Astronautka musi starzeć się wolniej. Nieco wolniej je obiad. I... ona... mówi... nieco... wolniej. Każdy proces na pokładzie rakiety zachodzi wolniej.

O ile wolniej — to zależy od prędkości v astronautki. Jeżeli ja się postarzeję o dziesięć lat, podobne obliczenia przy użyciu świetlnego zegara[4] wskazują, że astronautka postarzeje się o 10 lat razy $\sqrt{[1 - (v^2/c^2)]}$. Dla prędkości, z jakimi mamy do czynienia w codziennym życiu, które są małe w porównaniu z prędkością światła, ten czynnik będzie bardzo bliski 1. Jeżeli v/c jest bardzo małe w stosunku do 1, to (v^2/c^2) jest jeszcze wielokrotnie mniejsze; jeżeli odejmiemy bardzo małą liczbę od jedynki, to nadal będziemy mieli liczbę bliską jedynki, a pierwiastek kwadratowy z 1 jest równy 1 — wszystko to razem oznacza, że przy małych prędkościach czynnik $\sqrt{[1 - (v^2/c^2)]}$ nie wpływa znacząco na proces starzenia. Przed wejściem do rakiety astronautka starzała się w takim samym tempie jak ja i żadne z nas nie zauważyło żadnej

różnicy. Dlatego zwykle nie widzimy, że poruszające się zegary tykają wolniej. Jeżeli jednak astronautka podróżuje z prędkością bliską prędkości światła, na przykład równą 99,995% prędkości światła, to v/c jest równe 0,99995, a $\sqrt{[1 - (v^2/c^2)]}$ jest równe 0,01. Możesz sprawdzić na kalkulatorze. Jeżeli ja postarzeję się o dziesięć lat, to astronautka postarzeje się o jedną dziesiątą roku. Przy prędkości bliskiej prędkości światła spowolnienie czasu na pokładzie jej rakiety może być znaczące.

Sprawdziliśmy doświadczalnie, że ten wzór jest poprawny. Fizycy wysyłali zegary atomowe w podróż samolotem dookoła świata w kierunku wschodnim, tak żeby prędkość samolotu dodawała się do prędkości rotacji Ziemi, a następnie porównywali wskazania tych zegarów z zegarami, które zostały na lotnisku. Po powrocie z podróży zegary były opóźnione (o około 59 nanosekund), dokładnie tak, jak przewidziałby Einstein. Miony mają okres połowicznego rozpadu równy 2,2 mikrosekundy, co oznacza, że połowa z nich rozpada się w ciągu 2,2 mikrosekundy. Ale miony, które biegną w kierunku Ziemi (jako produkt promieniowania kosmicznego) z prędkością bliską prędkości światła, rozpadają się znacznie wolniej, zgodnie ze wzorem Einsteina. Uważamy, że ten wzór jest poprawny, ponieważ przetestowaliśmy go wielokrotnie. Żyjemy w dziwnym Wszechświecie, który funkcjonuje w zaskakujący sposób, ale wydaje się, że taki właśnie jest nasz Wszechświat. Wydaje się, że dwa postulaty Einsteina są poprawne. W następnym rozdziale zobaczymy, iż te postulaty prowadzą także do wniosku, że $E = mc^2$, co także zostało zweryfikowane — w bombie atomowej. Niektóre konsekwencje postulatów Einsteina są zaskakujące, ponieważ same postulaty są zaskakujące, ale im więcej mamy dowodów, tym bardziej ufamy, że są poprawne.

18 – Konsekwencje szczególnej teorii względności

J. Richard Gott

Einsteinowska szczególna teoria względności zrewolucjonizowała nasz sposób postrzegania przestrzeni i czasu. Sugeruje ona, że czas może być traktowany jako czwarty wymiar — na dodatek do trzech wymiarów przestrzennych. Co ciekawe, geometryczny formalizm opisu przestrzeni i czasu w szczególnej teorii względności opracował i opublikował w 1907 roku Hermann Minkowski, wykładowca matematyki w Zurychu (gdzie m.in. uczył Einsteina), a Einstein zaakceptował formalizm Minkowskiego. Żyjemy w czterowymiarowym wszechświecie. Jak należy to rozumieć? Mówimy, że powierzchnia Ziemi jest dwuwymiarowa. Aby zlokalizować punkt na powierzchni Ziemi, trzeba podać dwie współrzędne — szerokość i długość geograficzną. Jeżeli znasz swoją szerokość i długość geograficzną, znasz swoje położenie na powierzchni Ziemi. Ale wszechświat jest czterowymiarowy, co oznacza, że musisz znać cztery współrzędne, aby wiedzieć, gdzie jesteś. Jeżeli

zaproszę cię na imprezę, to będę musiał podać ci szerokość i długość geograficzną mojego domu. Muszę także podać wysokość — jeżeli impreza jest na dwunastym piętrze, to nie chciałbyś wylądować na czwartym! No i muszę także powiedzieć, o której godzinie powinieneś się zjawić. Jeżeli przyjdziesz w innym momencie, albo wysiądziesz z windy na czwartym piętrze, to nie weźmiesz udziału w imprezie. Każde zdarzenie, na przykład przyjęcie noworoczne na pięćdziesiątym czwartym piętrze, na Piątej Alei czy na Trzydziestej Czwartej Ulicy, wymaga czterech współrzędnych: dwóch współrzędnych geograficznych, abyś wiedział, dokąd się udać na powierzchni Ziemi; wysokości nad powierzchnią Ziemi; oraz czasu zdarzenia. Skoro potrzebne są cztery współrzędne, znaczy to, że żyjemy w czterowymiarowym wszechświecie.

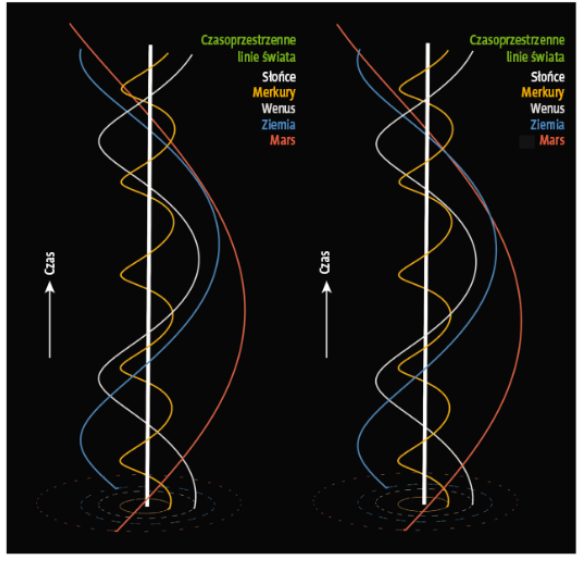
Możemy wykorzystać koncepcje Minkowskiego, aby rysować diagramy czasoprzestrzenne. Na pewno widziałeś w podręcznikach obrazy Ziemi krążącej wokół Słońca. Słońce jest zazwyczaj przedstawiane jako duża, biała kropka w środku, a orbita Ziemi jako okrąg, w którego centrum leży ta kropka (ponieważ eliptyczna orbita Ziemi jest bardzo zbliżona do kołowej). Ziemia może być przedstawiona jako mała niebieska kropka na okręgu, w położeniu określonym zazwyczaj jako godzina 12, które reprezentuje położenie Ziemi na orbicie w dniu 1 stycznia. Jeżeli chcemy zilustrować ruch Ziemi na orbicie, możemy narysować sekwencję takich rysunków, na których Ziemia zmienia swoje położenie, przemieszczając się wzdłuż okręgu przeciwnie do ruchu wskazówek zegara. 1 lutego powinna się znaleźć na 11 godzinie, 1 marca na 10 godzinie i tak dalej. Możesz zrobić z tej sekwencji film, ustawiając kolejne rysunki jako kolejne klatki filmu. Puszczając kolejne klatki, zobaczysz Ziemię krążącą wokół Słońca.

A teraz wyobraź sobie, że bierzesz ten film, tniesz go na pojedyncze klatki i ustawiasz te klatki pionowo jedna nad drugą, tworząc pionowy stosik. Każda klatka reprezentuje określony moment w czasie, a klatki leżące wyżej reprezentują późniejsze momenty. W ten sposób możesz zrobić czasoprzestrzenny obraz ruchu Ziemi wokół Słońca. Czas jest pionową współrzędną stosu klatek — przyszłość jest u góry, a przeszłość u dołu. Dwa poziome kierunki reprezentują dwa wymiary przestrzeni (tak, jakbyś je widział na dwuwymiarowym obrazie Ziemi krążącej wokół Słońca). Słońce się nie porusza, przez cały czas jest w centrum, więc wszystkie obrazy Słońca tworzą biały pręt ustawiony pionowo i przechodzący przez środek stosu klatek. Ale na każdej kolejnej klatce Ziemia przesuwa się do nowego położenia, w miarę jak podąża wzdłuż orbity wokół Słońca, przeciwnie do ruchu wskazówek zegara; w rezultacie Ziemia tworzy w stosie klatek niebieską helisę, nawiniętą wokół białego pręta. Promień tej helisy jest równy 8 minutom świetlnym — tyle wynosi promień orbity Ziemi. Helisa wykonuje jeden obrót wokół Słońca na rok. Niebieska helisa nawinięta na biały pręt stanowi diagram czasoprzestrzenny. Możemy dodać orbity Merkurego, Wenus i Marsa, rysując kolejne helisy, które także są nawinięte na biały pręt. Diagram jest trójwymiarowy; pomijam jeden wymiar przestrzenny, aby możliwa była wizualizacja diagramu. Nie da się zwizualizować czterowymiarowego

diagramu, ponieważ widzimy tylko trzy wymiary. Na ilustracji 18.1 zamieszczony jest trójwymiarowy (3D) diagram w postaci stereoskopowej pary. Możesz potraktować go jako dwie fotografie trójwymiarowego modelu, wykonane w dwóch różnych położeniach, lub — korzystając z instrukcji umieszczonej na stronie 61 — zobaczyć trójwymiarowy obraz w pełnej krasie.

Biały, pionowy pręt reprezentuje linię świata Słońca — jego trajektorię w przestrzeni i w czasie. Jest biały, ponieważ — jak dowiedzieliśmy się w rozdziale 4 — Słońce jest białe (a nie żółte). Niebieska helisa jest linią świata Ziemi — jej trajektorią w czasoprzestrzeni. Zwróć uwagę, jak niebieska helisa przechodzi naprzemiennie przed i za pionową linią świata Słońca. Pomarańczowa helisa, nawinięta ciasno wokół Słońca, jest linią świata Merkurego, który okrąża Słońce w ciągu 88 dni. Szara helisa jest linią świata Wenus, a czerwona linią świata Marsa. Im dalej od Słońca znajduje się dana planeta, tym luźniej jej helisa jest nawinięta na linię świata Słońca. Jeżeli chcesz widzieć świat w czterech wymiarach, to nie powinieneś postrzegać Ziemi w postaci sfery, lecz jako długi kawałek spaghetti, helisę nawiniętą na linię świata Słońca. Ziemia ma także wymiar w czasie.

Ty także masz linię świata. Zaczyna się wraz z twoim narodzeniem, wije się przez wszystkie zdarzenia twojego życia i kończy się twoją śmiercią. Twoja linia świata ma grubość około stopy, szerokość około dwóch stóp, wysokość sześć stóp; i może jakieś osiemdziesiąt lat trwania, jeżeli będziesz miał szczęście. Tak wyglądają czasoprzestrzenne diagramy, w których zastygłe w bezruchu linie świata przeplatają się w statycznej, czterowymiarowej, czasoprzestrzennej rzeźbie.

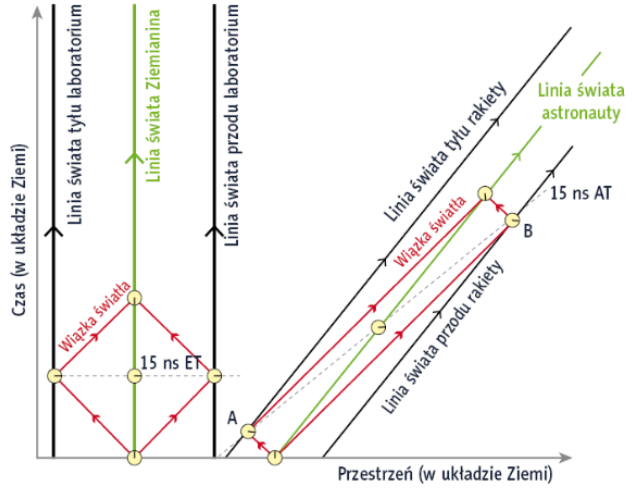


ILUSTRACJA 18.1. Diagram czasoprzestrzenny dla wewnętrznych planet Układu Słonecznego. Pionowa współrzędna reprezentuje czas, a dwa wymiary przestrzenne są przedstawione poziomo. Jest to trójwymiarowy obraz, więc utworzyliśmy stereoskopową parę ze skrzyżowanymi liniami wzroku. Aby zobaczyć trójwymiarowy obraz, możesz skorzystać z instrukcji zamieszczonej na s. 61. Linię świata Słońca reprezentuje biała, pionowa linia w środku. Ziemia krążąca wokół Słońca przeciwnie do ruchu wskazówek zegara najpierw przechodzi przed Słońcem, a następnie za nim

(wyżej na diagramie). Merkury, Wenus, Ziemia i Mars mają coraz większe okresy orbitalne, a zatem coraz luźniej są nawinięte ich helisy

Photo credit: Robert J. Vanderbei, J. Richard Gott

Możemy narysować diagramy czasoprzestrzenne dla eksperymentów myślowych, które Einstein zaproponował, rozważając kwestię równoczesności. Przypuśćmy, że siedzę w moim laboratorium, którego szerokość wynosi trzydzieści stóp. Jestem Ziemianinem (mieszkańcem Ziemi — ang. *Earthling*). Laboratorium jest nieruchome względem Ziemi, a ja siedzę nieruchomo na środku laboratorium. Na diagramie czasoprzestrzennym (il. 18.2) pozioma współrzędna reprezentuje przestrzeń, a pionowa reprezentuje czas. Moja linia świata rozciąga się pionowo w górę, ponieważ czas płynie, więc poruszam się w czasie, ale nie poruszam się w przestrzeni (ani w lewo, ani w prawo). Przednia ściana mojego laboratorium nie porusza się, więc jego linia świata jest także pionową kreską; i podobnie tylna ściana. Linia świata tylnej ściany, moja (Ziemianina) oraz linia świata przedniej ściany tworzą trzy równoległe pionowe linie. Przyszłość jest u góry, przeszłość jest u dołu. Linia świata przedniej ściany mojego laboratorium jest pionową linią po lewej, a linia świata tylnej ściany — po prawej stronie mojej linii świata. Skale na osiach są tak dobrane, że odległość mierzymy w stopach, a czas w nanosekundach. Światło porusza się w pustej przestrzeni z prędkością jednej stopy na nanosekundę. Wiązki światła tworzą diagonalne linie pod kątem 45° względem pionu.



ILUSTRACJA 18.2. Diagram czasoprzestrzenny dla mojego laboratorium oraz dla rakiety astronauty

Credit: J. Richard Gott, *Time Travel in Einstein's Universe*, Houghton Mifflin, 2001

Załóżmy, że w chwili $t = 0$ (czasu ziemskiego, ET — ang. *Earth time*; czas pokazuje mały żółty zegar leżący na mojej linii świata, ze wskazówką skierowaną do góry) wysyłam dwie wiązki światła, jedną do lustra na przedniej ścianie, drugą do lustra na tylnej ścianie. Linie świata tych dwóch wiązek reprezentują na diagramie diagonalne czerwone linie, nachylone pod kątem 45° względem pionu. Obie wiązki równocześnie docierają do celu (obie mają do pokonania jednakowy dystans 15 stóp), w czasie 15 nanosekund (czasu ziemskiego, ET). Dwa małe, żółte, 60-nanosekundowe zegary są

narysowane w miejscach, w których te dwie wiązki trafiają w lustra na przedniej i na tylnej ścianie. Oba zegary wskazują 15 nanosekund (ET). Linia świata Ziemianina (czyli moja) również ma zegar, który wskazuje 15 nanosekund (ET). Te trzy zegary wskazujące 15 nanosekund łączy pozioma przerywana linia. W moim układzie odniesienia ta linia łączy równoczesne zdarzenia. Gdy wiązki światła odbiją się od luster na przedniej i na tylnej ścianie laboratorium, zawrócą w moim kierunku i dotrą do mnie w tym samym czasie, 30 nanosekund po starcie. Gdy wiązki wrócą do mnie, na moim zegarze będzie 30 nanosekund, ponieważ wiązki laserowe, podróżujące z prędkością światła, pokonają 15 stóp w jedną stronę i 15 stóp z powrotem, co daje łączny dystans 30 stóp w czasie 30 nanosekund. Jak dotąd, wszystko się zgadza.

A teraz, naśladując rozumowanie Einsteina, rozważmy astronautę, który podróżując w swojej rakiecie z prędkością równą 80% prędkości światła, przelatuje w pobliżu mojego laboratorium. Linia świata astronauty musi być nachylona, ponieważ na każde 4 stopy, które jego rakieta pokonuje, lecąc w prawo, musi upłynąć 5 nanosekund na skali czasu. Astronauta porusza się z prędkością 4/5 (czyli 80%) prędkości światła, przód rakiety porusza się z taką samą prędkością, tył rakiety porusza się z taką samą prędkością, a zatem linia świata tyłu rakiety, linia świata astronauty oraz linia świata przodu rakiety mają takie samo nachylenie na diagramie. Astronauta, przód rakiety i tył rakiety są względem siebie nieruchome. Ich linie świata są równoległe. W pewnym momencie astronauta siedzący w środku rakiety wysyła dwie wiązki laserowe, jedną do lustra na przedniej ścianie rakiety, drugą do lustra na tylnej ścianie. Ja wykonuję pomiar długości rakiety i dostaję wynik równy 18 stóp (więcej na ten temat w dalszej części rozdziału). Wiązka laserowa, którą astronauta wysyła w lewo, ma do pokonania 9 stóp (połowa z 18 stóp), po czym trafia w tył rakiety. Ja obserwuję ten eksperyment przez boczne okno w rakiecie. Widzę, jak tył rakiety przemieszcza się 4 stopy w prawo w ciągu 5 nanosekund, podczas gdy wiązka lasera pokonuje 5 stóp w lewo w trakcie tych samych 5 nanosekund; 4 stopy plus 5 stóp daje 9 stóp, a zatem wiązka laserowa potrzebuje 5 nanosekund, aby trafić w tył rakiety, pokonując pierwotną odległość 9 stóp. Zatem w moim układzie odniesienia (ET) wiązka laserowa trafia w tył rakiety w ciągu 5 nanosekund czasu ziemskiego. Promień lasera leci w lewo, rakieta leci w prawo, więc szybko dochodzi do ich kolizji (w moim układzie odniesienia).

Wiązka laserowa, którą astronauta wysyła w prawo, musi dogonić przód rakiety, który się oddala, więc potrwa to dłużej (w moim układzie odniesienia). W ciągu 45 nanosekund (ET) promień lasera pokona 45 stóp (zgodnie z drugim postulatem Einsteina światło porusza się ze stałą prędkością 1 stopy na nanosekundę), natomiast przód rakiety pokona tylko 36 stóp (czyli 4/5 z 45 stóp). W ciągu 45 nanosekund promień lasera pokona 45 stóp, rakieta pokona 36 stóp, czyli 9 stóp mniej, ale przód rakiety miał 9 stóp przewagi na starcie, więc wiązka lasera trafi w przód rakiety po 45 nanosekundach od startu (czasu ET). Oznacza to, że ja zaobserwuję, jak wiązka laserowa lecąca w lewo trafi w tył rakiety wcześniej niż wiązka laserowa

lecąca w prawo trafi w przód rakiety. W moim układzie odniesienia te dwa zdarzenia — trafienia wiązek laserowych w tył i w przód rakiety — nie są równoczesne.

A co widzi astronauta? Podróżuje z jednostajną prędkością w stałym kierunku, więc zgodnie z pierwszym postulatem ma prawo uważać, że jest nieruchomy. Siedzi nieruchomo w swojej rakiecie, która jest nieruchoma względem niego, i wysyła wiązki laserowe do przodu i do tyłu. Siedzi w połowie długości rakiety, rakieta się nie porusza, więc musi stwierdzić, że dwie wiązki laserowe poruszające się z prędkością światła muszą dotrzeć do celu w takim samym czasie. Z jego punktu widzenia (w jego układzie odniesienia) te dwa zdarzenia — trafienia wiązek laserowych w tył i w przód rakiety — są równoczesne. Ja (Ziemianin) widzę, że promienie lasera nie trafiają w swoje cele równocześnie — najpierw laserem dostaje tył, a potem przód rakiety. Nie zgadzamy się co do tego, które zdarzenia są równoczesne. Ta konkluzja jest wprawdzie sprzeczna ze zdrowym rozsądkiem, ale jest bezpośrednią konsekwencją postulatów szczególnej teorii względności.

Warto zauważyć, że w owym czasie, gdy Einstein sformułował ten eksperyment myślowy, jako przykładu nie mógł użyć astronauty w rakiecie z lustrami na przedniej i na tylnej ścianie rakiety, lecz użył pasażera pociągu z lustrami z przodu i z tyłu pociągu. W 1905 roku najszybszymi pojazdami były pociągi... jeżdżące z prędkością poniżej 200 kilometrów na godzinę!

Ja kroję czasoprzestrzeń inaczej niż astronauta. Pomyśl o czterowymiarowej czasoprzestrzeni, jakby to był bochenek chleba. Ja kroję chleb na kromki (plastry) tak, jak się kroi amerykańskie bochenki. Jeżeli ustawię amerykański chleb na jednym końcu, pojedyncze kromki będą poziome. Poziome plastry reprezentują poszczególne momenty ziemskiego czasu (ET). Każdy plaster zawiera zdarzenia równoczesne w moim układzie odniesienia. Astronauta kroi chleb na plastry inaczej niż ja. Nazwijmy go Jacques (jest Francuzem). Jacques kroi czasoprzestrzeń skośnie, tak jak się kroi francuskie bochenki chleba. Jego skośne plastry reprezentują momenty czasu astronauty (AT — ang. *astronaut time*). Jacques i ja nie zgadzamy się co do tego, które zdarzenia są równoczesne, czyli które zdarzenia należą do jednego plastra. Inaczej tniemy plastry, ale obaj widzimy ten sam bochenek. Według Einsteina realne są tylko te rzeczy, które są niezależne od obserwatora. Przestrzeń i czas jako osobne obiekty nie są realne. Ja mówię, że teraźniejszość jest poziomą kromką amerykańskiego chleba, ale Jacques mówi, że teraźniejszość jest ukośną kromką francuskiego chleba. Nie zgadzamy się co do tego, czym jest teraźniejszość, ponieważ on się porusza względem mnie. Nie zgadzamy się co do tego, które zdarzenia są w przeszłości, a które w przyszłości. Ale zgadzamy się co do bochenka czasoprzestrzeni. Realna jest cała czterowymiarowa czasoprzestrzeń.

Powróćmy do laboratorium i ponownie przyjrzyjmy się rakiecie. Wiązka laserowa, która odbiła się od lustra na przodzie rakiety, potrzebuje tylko 5 nanosekund (w moim układzie odniesienia), aby wrócić do Jacques'a. Widzę jak promień lasera i Jacques zbliżają się do siebie; promień potrzebuje tylko 5 nanosekund, aby pokonać 5 stóp wstecz, podczas gdy rakieta w tym czasie

przemieści się 4 stopy do przodu, zamykając pierwotny dystans 9 stóp. W moim układzie odniesienia wiązka laserowa wysłana do przodu potrzebuje łącznie 45 nanosekund plus 5 nanosekund = 50 nanosekund, aby dolecieć do lustra, odbić się i wrócić. Wiązka laserowa wysłana do tyłu potrzebuje 45 nanosekund, aby dogonić astronautę. Aby obrócić tam i z powrotem, w moim układzie odniesienia potrzebuje łącznie 5 + 45 = 50 nanosekund ziemskiego czasu (ET). A zatem widzę, że obie wiązki wracają do astronauty w tym samym momencie. On także musi stwierdzić, że wiązki wracają w tym samym momencie, ponieważ (w jego układzie odniesienia) wracają w tym samym czasie i w to samo miejsce.

Ja widzę, że upływa 50 nanosekund między wysłaniem wiązek i ich powrotem do Jacques'a. Widzę także, że jego rakieta porusza się z prędkością 80% prędkości światła ($v/c = 0{,}8$), więc muszę widzieć, że jego zegary tykają w tempie równym 60% (czyli $\sqrt{[1 - (v^2/c^2)]}$ w stosunku do tempa moich zegarów. Jeżeli widzę, że upłynęło 50 nanosekund, to muszę także widzieć, że astronauta postarzał się tylko o 30 nanosekund. Gdy astronauta zarejestruje powrót obu wiązek, stwierdzi, że to zdarzenie zaszło po 30 nanosekundach czasu astronauty (AT), ponieważ jest 30 nanosekund starszy w momencie, gdy wiązki powróciły. Wiązki musiały trafić w przód i w tył rakiety równocześnie, po 15 nanosekundach AT. Zwróć uwagę na ukośną (jak francuskie kromki), przerywaną linię, oznaczoną „15 ns AT". Łączy ona równoczesne zdarzenia w układzie odniesienia astronauty. Astronauta uważa, że jest w spoczynku, więc z jego punktu widzenia cała sytuacja wygląda tak, jak sytuacja w moim laboratorium z mojego punktu widzenia. W jego układzie odniesienia wiązki laserowe potrzebowały 30 nanosekund, aby obrócić tam i z powrotem, więc musi dojść do wniosku, że jego rakieta ma 30 stóp długości.

Gdy wiązki lasera astronauty trafiają w tył i w przód jego rakiety, w moim układzie odniesienia są to dwa zdarzenia oddzielone w przestrzeni o 50 stóp i w czasie o 40 nanosekund. Wykorzystując prędkość światła (1 stopa na nanosekundę) do porównywania odległości w przestrzeni z odległościami w czasie, mogę stwierdzić, że odległość tych dwóch zdarzeń w przestrzeni jest większa niż ich odległość w czasie. Dowolne dwa zdarzenia, których odległość w przestrzeni jest większa niż odległość w czasie, określamy jako rozdzielone przestrzennopodobnie, a ich odległość w czasoprzestrzeni nazywamy interwałem przestrzennopodobnym (ang. *spacelike interval*). Zawsze znajdzie się astronauta podróżujący z dużą prędkością (ale mniejszą od prędkości światła), który stwierdzi, że te dwa zdarzenia są równoczesne, czyli uzna, że są one rozdzielone w przestrzeni, ale nie są rozdzielone w czasie. Einstein pokazał, że dowolni dwaj obserwatorzy mogą się jednak zgodzić co do pewnej wielkości, zwanej interwałem czasoprzestrzennym, oznaczanej zwykle symbolem Δs^2. Aby go obliczyć, należy od kwadratu odległości dwóch zdarzeń w przestrzeni odjąć kwadrat ich odległości w czasie. Stosując jednostki, w których prędkość światła jest równa 1 (czyli 1 stopa = 1 nanosekunda), mogę obliczyć, że odległość dwóch omawianych powyżej zdarzeń w przestrzeni wynosi 50, natomiast ich odległość w czasie wynosi 40. W rezultacie mogę obliczyć interwał czasoprzestrzenny, który wynosi

$\Delta s^2 = 50^2 - 40^2 = 2500 - 1600 = 900$. Jednak astronauta Jacques widzi poszczególne odległości nieco inaczej. Według niego różnica czasu między tymi dwoma zdarzeniami wynosi 0, a odległość w przestrzeni wynosi 30 (jak pamiętamy, długość rakiety w jego układzie odniesienia wynosi 30 stóp). Gdy jednak Jacques policzy Δs^2, otrzyma wynik $\Delta s^2 = 30^2 - 0^2 = 900$, czyli dokładnie tyle co ja. Możemy się nie zgadzać co do poszczególnych odległości, ale zgadzamy się w pewnych istotnych kwestiach.

Rozważmy teraz odległość między wysłaniem sygnału świetlnego przez astronautę i dotarciem sygnału do tylnej ściany rakiety. Odległość w przestrzeni, którą ja zmierzę między tymi dwoma zdarzeniami, wynosi 5 stóp, a czas jaki zmierzę między nimi, wynosi 5 nanosekund. A zatem gdy policzę Δs^2, czyli (odległość w przestrzeni)^2 – (odległość w czasie)^2, dostanę wynik $\Delta s^2 = 5^2 - 5^2 = 0$. Gdy astronauta zmierzy te odległości, otrzyma 15 stóp jako odległość w przestrzeni oraz 15 nanosekund jako odległość w czasie, więc obliczy $\Delta s^2 = 15^2 - 15^2 = 0$, czyli dokładnie tyle ile ja. Dwa zdarzenia, które łączy promień światła, zawsze mają interwał zerowy — dowolny obserwator obliczy $\Delta s^2 = 0$. Zgodnie z drugim postulatem Einsteina każdy obserwator musi widzieć, że promień światła porusza się ze stałą prędkością równą 1 w tych jednostkach (1 stopa na nanosekundę), a zatem odległość w przestrzeni musi być równa odległości w czasie, czyli Δs^2 musi być równe zeru. W istocie znak minus we wzorze na Δs^2 jest po to, aby zagwarantować, że drugi postulat jest zawsze spełniony.

Twierdzenie Pitagorasa mówi, że we współrzędnych kartezjańskich (x, y) na płaszczyźnie, jeżeli różnice współrzędnych dwóch punktów wynoszą odpowiednio Δx i Δy, to ich (odległość w przestrzeni)$^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2$. Kwadrat przeciwprostokątnej trójkąta prostokątnego jest równy sumie kwadratów dwóch pozostałych boków — przyprostokątnych. W trójwymiarowej przestrzeni ze współrzędnymi kartezjańskimi (x, y, z) uogólnione twierdzenie Pitagorasa brzmi: (odległość w przestrzeni)$^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$. To jest licealna trójwymiarowa geometria euklidesowa — stereometria. A Einstein mówi, że Δs^2 = (odległość w przestrzeni)^2 – (odległość w czasie)^2. Podstawiając Pitagorasa, dostajemy $\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$ – (odległość w czasie)^2. A odległość w czasie to przecież Δt. Więc podstawiając także Δt, dostajemy $\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - \Delta t^2$. Różnica między współrzędną czasową t i współrzędnymi przestrzennymi (x, y, z) sprowadza się zatem do znaku minus stojącym przed Δt^2. Ten mały minus robi całą różnicę. Powoduje, że wymiar czasu różni się od zwykłych wymiarów przestrzennych, a i to wszystko po to, aby prędkość światła była stała.

Świetnie! To spora dawka arytmetyki, ale prowadzi nas do istotnej kwestii — różnicy między czasem i współrzędnymi przestrzennymi.

Zacząłem analizę interwałów od stwierdzenia, że zmierzona przeze mnie długość rakiety wynosi 18 stóp. Astronauta Jacques uważa, że jego rakieta ma 30 stóp, więc mój pomiar dał mniejszy wynik. Ja uważam, że długość rakiety jest mniejsza o czynnik $\sqrt{[1 - (v^2/c^2)]}$ od długości zmierzonej przez Jacques'a. Nasze zegary się nie zgadzają, nasze linijki się nie zgadzają, a wszystko

dlatego, że gdy mierzymy prędkość światła, zawsze wychodzi 1 (stopa na nanosekundę). Dlaczego możemy się różnić co do długości rakiety? Wynika to z faktu, że wykonujemy różne „cięcia" przez bochenek. Ja mierzę długość w określonym momencie ziemskiego czasu (ET), a Jacques mierzy ją w określonym momencie czasu astronauty (AT). Ja wycinam poziomą, amerykańską kromkę przechodzącą przez linię świata jego rakiety, a on wycina francuską kromkę. Aby użyć nieco innej przenośni — gdybym przeciął pień drzewa poziomo, a następnie stwierdził, że „pień jest gruby na 6 cali", a ktoś inny przeciąłby pień ukośnie i stwierdził, że pień ma 10 cali, to mielibyśmy dwie różne opinie. Pień drzewa jest ten sam, ale wykonujemy cięcia pod różnymi kątami. Astronauta i ja wykonujemy różne cięcia przez linię świata rakiety.

Dlaczego to jest takie istotne? Rozważmy ekstremalny przypadek, gdy astronauta oddala się od Ziemi z prędkością 99,995% prędkości światła, podążając w kierunku Betelgezy, gwiazdy odległej od nas o 500 lat świetlnych. Widzę, że zajmie mu to około pięciuset lat (ET), ponieważ podróżuje z prędkością bliską prędkości światła, a Betelgeza jest oddalona od nas o 500 lat świetlnych. Ale magiczny czynnik $\sqrt{[1 - (v^2/c^2)]}$ wynosi wtedy 1/100, więc widzę, że w czasie podróży astronauta zestarzeje się tylko o 5 lat, ponieważ (1/100) × 500 lat daje 5 lat. Widzę, że jego zegary tykają bardzo wolno, ponieważ poruszają się bardzo szybko. Widzę, że wszystko, co robi, zajmuje mu bardzo dużo czasu według mojego zegara — na samo śniadanie potrzebuje stu godzin! Gdy dotrze do Betelgezy, rzeczywiście będzie starszy tylko o 5 lat.

A jak ta podróż wygląda z jego punktu widzenia? On myśli, że jest nieruchomy, a Ziemia i Betelgeza przelatują koło niego z prędkością 99,995% prędkości światła. Najpierw widzi, jak mija go Ziemia — błysk, a 5 lat później mija go Betelgeza — błysk. Ziemia i Betelgeza są w zasadzie nieruchome względem siebie, czyli leżą na równoległych liniach świata. Z jego punktu widzenia układ Ziemia + Betelgeza wygląda jak długa rakieta, z Ziemią na dziobie i Betelgezą na rufie. A skoro ta długa rakieta porusza się względem niego z prędkością bliską prędkości światła, i potrzebuje na to 5 lat, astronauta musi dojść do wniosku, że długość układu Ziemia + + Betelgeza wynosi 5 lat świetlnych. Czyli wydedukuje, że odległość Betelgezy od Ziemi wynosi tylko 5 lat świetlnych. W jego układzie odniesienia odległość Betelgezy od Ziemi jest równa 1/100 mojej odległości. Wszystkie moje odległości astronauta widzi skompresowane — sto razy krótsze, niż ja je widzę. Czynnik kompresji (skrócenia) długości, które on obserwuje, $\sqrt{[1 - (v^2/c^2)]}$ wynosi tyle samo co czynnik kompresji czasu, który ja obserwuję, gdy widzę, że on starzeje się wolniej. Jest to niewątpliwie jeden z najbardziej zdumiewających aspektów szczególnej teorii względności, piękny w swej symetrii i swej nieodpartej logice.

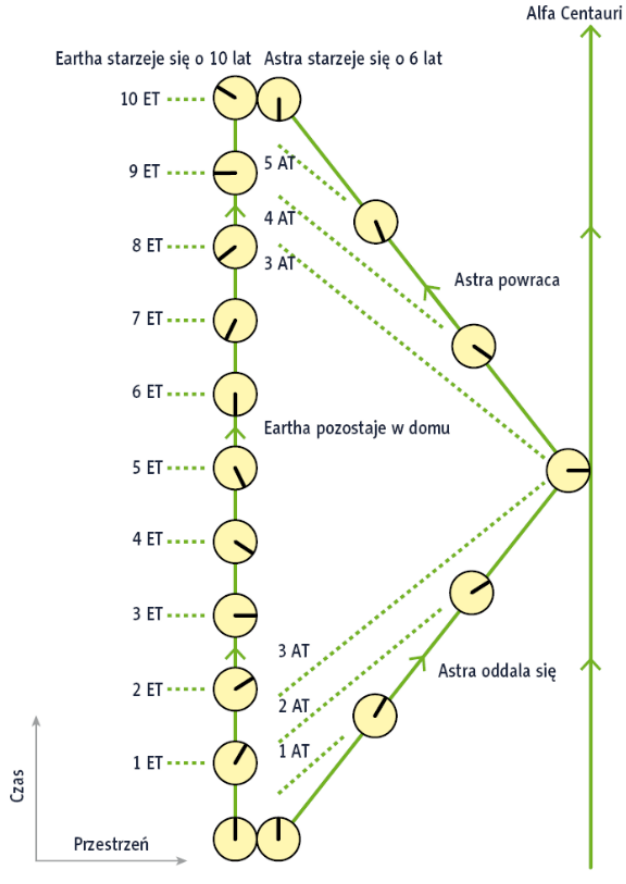
Rozmaici obserwatorzy różnią się w kwestii, czy dane dwa zdarzenia są równoczesne czy nie, co prowadzi do pewnych (pozornych) paradoksów. Jednym z nich jest tak zwany paradoks tyczki i stodoły. Załóżmy, że mój astronauta, Jacques, jest sportowcem — tyczkarzem — i biegnie z prędkością 80% prędkości światła (względem mnie) z tyczką w ręce skierowaną wzdłuż

kierunku biegu. Tyczka ma 30 stóp długości, lecz ja, stojąc obok bieżni, widzę, że tyczka ma tylko 18 stóp. Przypuśćmy, że na środku bieżni stoi stodoła z otwartymi frontowymi drzwiami, przez które Jacques właśnie wbiega do środka. Tylne drzwi stodoły są zamknięte. Stodoła jest długa na 30 stóp — tyle wynosi odległość od frontowych do tylnych drzwi. W momencie, gdy Jacques znajduje się dokładnie w środku stodoły, zamykam przednie drzwi. Jego 18-stopowa tyczka jest w całości uwięziona wewnątrz mojej 30-stopowej stodoły. W tym momencie otwieram tylne drzwi i pozwalam mu biec dalej. W ten sposób Jacques może przebiec przez stodołę bez zatrzymywania, bez żadnych zakłóceń, nie zmieniając swojej prędkości. A jak to wygląda z jego punktu widzenia? On postrzega to w taki sposób, że stoi nieruchomo na bieżni, trzymając w ręce 30-stopową tyczkę. Widzi stodołę zbliżającą się do niego z prędkością 80% prędkości światła. Widzi, że stodoła ma 18 stóp długości. Gdy Jacques znajduje się dokładnie w środku stodoły, widzi, że jego 30-stopowa tyczka wystaje zarówno przez przednie, jak i przez tylne drzwi mojej 18-stopowej stodoły. Nie da się zamknąć obu drzwi i uwięzić tyczki wewnątrz. To wygląda jak paradoks. A oto wyjaśnienie. W momencie, gdy ja zamykam przednie drzwi, obie pary drzwi, przednie i tylne, są zamknięte. Są równocześnie zamknięte — równocześnie według mnie, ale nie według Jacques'a. On inaczej przecina czasoprzestrzeń, pod innym kątem niż ja. Jacques widzi, że ja zamykam przednie drzwi i otwieram tylne w różnych momentach. Według niego w żadnym momencie przednie i tylne drzwi nie są równocześnie zamknięte. Gdy Jacques przebiega przez stodołę ze swoją tyczką, oba końce tyczki wystają na obu końcach stodoły.

Jesteśmy pełni podziwu, że Einstein potrafił poprawnie zinterpretować wszystkie swoje eksperymenty myślowe. Wcześniej nikt nie próbował takiej metody rozumowania, w której wykonuje się oparte na postulatach eksperymenty myślowe. Jest to jedna z najbardziej oryginalnych cech jego pracy nad teorią względności.

Zajmiemy się teraz kolejnym pozornym paradoksem, słynnym pa-radoksem bliźniąt. W tym przypadku jedna z bliźniaczek — nazwiemy ją Eartha — pozostaje w domu na Ziemi, podczas gdy jej siostra, Astra, podróżuje do Alfy Centauri, 4 lata świetlne stąd, z prędkością równą 80% prędkości światła, a następnie zawraca i podróżuje w kierunku Ziemi z prędkością równą 80% prędkości światła. Eartha widzi[5] Astrę poruszającą się z 4/5 prędkości światła, więc widzi, że Astra potrzebuje pięciu ziemskich lat, aby dotrzeć do Alfy Centauri i pięciu ziemskich lat, aby dotrzeć z powrotem do Ziemi. Gdy Astra wraca do domu, Eartha jest starsza o dziesięć lat. Skoro Eartha widzi Astrę poruszającą się z prędkością równą 80% prędkości światła, musi także widzieć, że Astra wolniej się starzeje. Zgodnie z naszym wzorem $\sqrt{[1 - (v^2/c^2)]}$ Eartha widzi, że Astra starzeje się w tempie 60% wolniejszym niż sama Eartha. Gdy Astra wraca do domu, Eartha spodziewa się, że Astra postarzała się o sześć lat. Jak dotąd wszystko się zgadza. Ale co widzi Astra? Skoro ruch jest względny, dlaczego Astra nie mogłaby pomyśleć, że to Eartha oddaliła się i powróciła z prędkością równą 80% prędkości światła? Dlaczego Astra nie

spodziewa się, że to Eartha jest młodsza, gdy ponownie się spotkają? Rozwiązanie polega na tym, że Astra musiała przyspieszać w trakcie swojej podróży. Gdy dotarła do Alfy Centauri, musiała wyhamować (wszystkie jej manatki uderzyły w przednią szybę jej statku), a następnie musiała przyspieszyć w kierunku Ziemi. Zmieniła swoją prędkość i odwróciła kierunek ruchu. Dlatego Astra nie spełnia wymagania z pierwszego postulatu, zgodnie z którym obserwator porusza się ruchem jednostajnym ze stałą prędkością bez zmiany kierunku (il. 18.3).



ILUSTRACJA 18.3. Diagram czasoprzestrzenny dla paradoksu bliźniąt. Eartha zostaje w domu. Jej linia świata jest prosta. Astra leci do Alfy Centauri i z powrotem. Jej linia

świata jest zakrzywiona. Astra starzeje się wolniej niż Eartha. Zegary pokazują czas mierzony przez każdą z nich. Przerywane linie pokazują czas Earthy (ET) i czas Astry (AT)

Credit: J. Richard Gott

W pierwszej części swojej podróży Astra oddala się od Ziemi, więc plastry czasu Astry (AT) są nachylone jak kromki francuskiego chleba. Gdy dociera do Alfy Centauri, jej zegar wskazuje 3 lata (AT), mówiąc jej, że postarzała się o 3 lata. Linia równoczesnych zdarzeń „3 AT" jest nachylona, więc przecina linię Earthy tylko 1,8 roku od startu. Gdy Astra dociera do Alfy Centauri, myśli że jest równoczesna z Earthą, która postarzała się tylko o 1,8 roku, czyli o 60% z 3 lat. A zatem Astra widzi Earthę starzejącą się wolniej, ponieważ uważa, że sama jest w spoczynku i że to Eartha oddala się od niej z prędkością równą 80% prędkości światła. W tym momencie Astra myśli, że Eartha postarzała się mniej. Ale chwileczkę! W tym momencie Astra naciska hamulce, zatrzymuje swoją rakietę i zawraca. W trakcie zawracania linia świata Astry zostaje zakrzywiona. Zmieniła prędkość i zmieniła kierunek, więc zmieniła się także jej percepcja równoczesności. W momencie, gdy wyrusza z Alfy Centauri w kierunku Ziemi, jej zegar nadal wskazuje „3 AT", ale teraz Astra porusza się w przeciwnym kierunku, więc linia równoczesnych zdarzeń „3 AT" jest teraz nachylona pod innym kątem i przecina linię Earthy 8,2 roku od startu. W momencie, gdy wyrusza w kierunku Ziemi, Astra myśli, że moment jej startu z Alfy Centauri jest równoczesny z wiekiem Earthy równym 8,2 roku. W trakcie podróży powrotnej Astra widzi, że Eartha starzeje się o dalsze 1,8 roku, podczas gdy ona, Astra, postarzeje się o kolejne 3 lata. W sumie daje to 8,2 + 1,8 = 10 lat dla Earthy, podczas gdy Astra postarzała się o 3 +3 = 6 lat od startu. Astra musi się więc zgodzić z Earthą, że Astra jest młodsza od Earthy o 4 lata, gdy ponownie się spotkają. Eartha podróżowała wzdłuż prostej linii świata, podczas gdy linia świata Astry jest zakrzywiona. W tej metodzie wyjaśniania paradoksu bliźniąt bardzo ważne jest pojęcie równoczesności, ale istnieje bardziej zaawansowana matematycznie metoda, która do tego pojęcia nie się odwołuje.

Paradoks bliźniąt pozwoli ci odwiedzić przyszłość. Jeżeli chcesz odwiedzić Ziemię za 1000 lat, licząc od dzisiaj, musisz wsiąść do rakiety i polecieć z prędkością równą 99,995% prędkości światła w kierunku Betelgezy, gwiazdy odległej od nas o 500 lat świetlnych. Twój zegar będzie tykał sto razy wolniej od ziemskich zegarów. Dotarcie do Betelgezy zajmie ci 500 lat według ziemskich zegarów, ale ty postarzejesz się tylko o 5 lat. Następnie musisz wrócić z prędkością równą 99,995% prędkości światła. Postarzejesz się o kolejne 5 lat, ale gdy wylądujesz, Ziemia będzie starsza o 1000 lat. Odbędziesz podróż do przyszłości. Taka podróż byłaby o wiele bardziej kosztowna niż aktualny budżet NASA (!) i oczywiście technologia budowy takich szybkich rakiet jeszcze nie istnieje, ale wiemy, że jest to możliwe i zgodne z prawami fizyki. W akceleratorach potrafimy rozpędzać protony do jeszcze większych prędkości, więc wiemy, że takie prędkości są możliwe. Wskazówka dla NASA — to tylko kwestia pieniędzy i inżynierii.

Zapewne obawiasz się, że ogromne przyspieszenia związane z zawracaniem na końcu podróży mogłyby stanowić zagrożenie dla życia pasażerów. Okazuje się, że taką podróż można zrealizować z przyspieszeniem równym tylko 1 g — takim samym, jakiego doświadczamy na powierzchni Ziemi. Twoje stopy będą naciskać na podłogę rakiety, ponieważ rakieta przyspiesza, ale nacisk będzie taki sam, z jakim stopy naciskają na podłogę twojego domu na Ziemi, pod wpływem grawitacji Ziemi. Podróż będzie nieco dłuższa, ale wygodna. W pierwszej fazie podróży twój statek będzie jednostajnie przyspieszał, aż po 6 latach i 3 tygodniach (na twoim zegarze, czyli według czasu AT) osiągnie prędkość równą 99,9992% prędkości światła. Wtedy przełączysz silniki na odwrotny ciąg i będziesz jednostajnie hamował, z opóźnieniem równym 1 g, przez kolejne 6 lat i 3 tygodnie, aż zatrzymasz się w pobliżu Betelgezy. Następnie będziesz jednostajnie przyspieszał w kierunku Ziemi przez 6 lat i 3 tygodnie i w końcu jednostajnie hamował przez kolejne 6 lat i 3 tygodnie, aż zatrzymasz się na Ziemi. W trakcie podróży postarzejesz się o 24 lata i 12 tygodni, ale Ziemia będzie starsza o 1000 lat. Musisz tylko zainwestować nieco więcej czasu (24 lata zamiast 10 lat), aby podróż była wygodna. Podróż Marco Polo do Chin i z powrotem trwała 24 lata. Jeżeli zainwestujesz tyle czasu co Marco Polo, możesz odwiedzić Ziemię w następnym tysiącleciu.

Giennadij Iwanowicz Padałka, rosyjski kosmonauta, jest rekordzistą świata w kategorii podróży w czasie. Krążąc na orbicie Ziemi z dużą prędkością w trakcie 879 dni, które spędził na rosyjskiej stacji Mir i na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej, postarzał się o 1/44 sekundy mniej, niż postarzałby się, gdyby siedział w domu (ten rachunek uwzględnia także nieco mniejsze efekty wynikające z różnicy odległości od Ziemi, oszacowane w ramach ogólnej teorii względności). Gdy wrócił na Ziemię, była starsza o 1/44 sekundy w stosunku do tego, czego się spodziewał. Odbył podróż w przyszłość o 1/44 sekundy. Wiem, że to jest śmiechu warte osiągnięcie. To nie jest wielka podróż, ale to jest podróż w przyszłość. Brałem kiedyś udział w programie National Public Radio, gdzie zapytano mnie, dlaczego tak łatwe są podróże w przestrzeni, a tak trudne w czasie. Odpowiedziałem, że w przestrzeni także nie dotarliśmy daleko![6] Einstein nauczył nas, że gdy porównujemy odległości w przestrzeni z odległościami w czasie, powinniśmy użyć prędkości światła jako przelicznika. Astronomowie mówią, że Alfa Centauri jest oddalona o 4 lata świetlne, ponieważ światło potrzebuje 4 lat, aby dotrzeć od niej do nas. Najdalszym miejscem, do którego dotarli nasi astronauci, jest Księżyc, który jest tylko 1,3 sekundy świetlnej od nas. Ludzkość dotarła na odległość 1,3 sekundy świetlnej w przestrzeni i na odległość 1/44 sekundy w przyszłość. Te odległości nie są równe, ale są porównywalne, i żadna nie zrobi wielkiego wrażenia na załodze „Enterprise".

Co ciekawe, aby zilustrować paradoks bliźniąt, mamy dwóch astronautów, którzy są parą jednojajowych bliźniaków. Mark Kelly spędził 54 dni na niskiej orbicie wokółziemskiej, podczas gdy jego brat bliźniak, Scott Kelly, spędził 519 dni na niskiej orbicie wokółziemskiej. Scott spędził więcej czasu, podróżując z dużą prędkością na niskiej orbicie wokółziemskiej, więc jest teraz około 1/87 sekundy młodszy od swojego brata Marka.

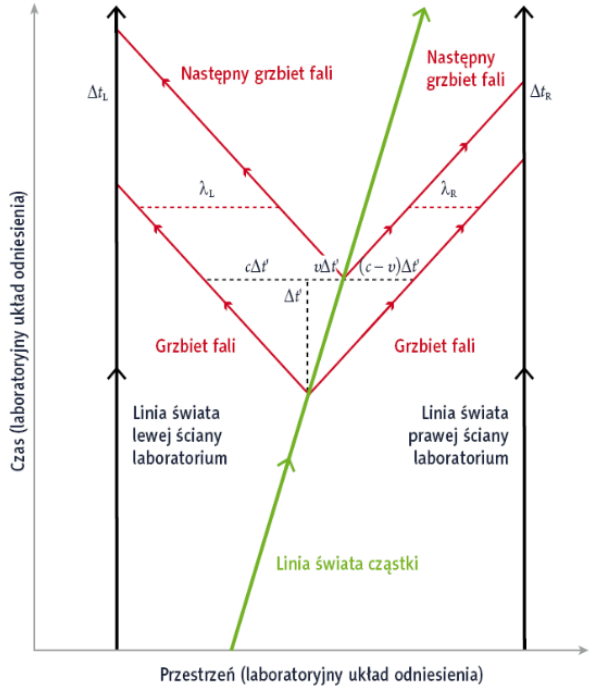
Zwróciłem uwagę, że gdybyśmy wysłali astronautkę na planetę Merkury, gdzie spędziłaby 30 lat, po powrocie na Ziemię byłaby około 22 sekund młodsza niż jej siostra bliźniaczka. Zegary na Merkurym tykają wolniej niż na Ziemi, ponieważ Merkury krąży wokół Słońca z większą prędkością niż Ziemia (efekt szczególnej teorii względności), a także dlatego, że Merkury jest głębiej w polu grawitacji Słońca (efekt ogólnej teorii względności)[7].

W 1905 roku Einstein pokazał, że podróż w przyszłość w czasie jest możliwa[8]. Było to zaledwie dziesięć lat po tym, jak H.G. Wells wysunął tę ideę w swojej książce *Wehikuł czasu*. W ramach Newtonowskich praw fizyki nie byłoby to możliwe — wszyscy zgadzali się, że jest jeden absolutny czas, wszyscy wiedzieli, co to jest „teraz", a podróż w przyszłość w czasie była niemożliwa. Ale Einstein pokazał, że różni obserwatorzy nie zawsze zgadzają się w kwestii tego, co się dzieje „teraz"; pokazał, że czas jest elastyczny — poruszające się zegary wolniej tykają. Einstein dał nam całkowicie nowy obraz Wszechświata, Wszechświata z trzema wymiarami przestrzennymi i jednym wymiarem czasowym.

Wyprowadzimy teraz słynny wzór Einsteina, $E = mc^2$. Przypuśćmy, że w twoim laboratorium cząstka o masie m porusza się powoli z lewej strony w prawo, z prędkością v znacznie mniejszą od prędkości światła (czyli $v << c$). Stosując prawa Newtona, możemy stwierdzić, że pęd tej cząstki wynosi $P = mv$, i jest skierowany w prawo. W pewnej chwili cząstka emituje dwa fotony o energii $E = h\nu_0$, w przeciwnych kierunkach: jeden w prawo, drugi w lewo. Korzystamy tu z innego wzoru Einsteina, określającego energię fotonów, gdzie h jest stałą Plancka, a ν_0 (grecka litera ν z indeksem 0) jest częstotliwością spoczynkową (czyli zmierzoną w układzie cząstki emitującej fotony) fotonów wyemitowanych przez cząstkę. Cząstka traci energię równą $\Delta E = 2h\nu_0$ równą energii unoszonej przez fotony. Einstein pokazał, że fotony mają nie tylko energię, ale także pęd. Pęd fotonu jest równy jego energii podzielonej przez prędkość światła c. Cząstka widzi dwa fotony oddalające się od niej z jednakowym pędem, lecz w przeciwnych kierunkach, więc całkowity pęd unoszony przez fotony jest równy zeru z punktu widzenia cząstki. Cząstka „myśli", że jest w spoczynku (zgodnie z pierwszym postulatem) i emituje dwa fotony w przeciwnych kierunkach. Z symetrii układu wynika, że jeżeli nieruchoma cząstka wyemituje dwa fotony o jednakowej częstotliwości, ale w przeciwnych kierunkach, to po emisji cząstka nadal pozostanie nieruchoma. Odrzuty pochodzące od obu fotonów wzajemnie się zniwelują. Linia świata cząstki będzie prosta — nie zmieni się ani jej prędkość, ani kierunek (il. 18.4).

Rozważmy teraz, co się stanie z tymi dwoma fotonami. Foton lecący w prawo trafi w prawą ścianę laboratorium, więc lekko popchnie ścianę w prawo. Jest to zjawisko zwane ciśnieniem promieniowania: ściana absorbuje foton, przejmuje jego pęd, więc zostaje popchnięta w prawo. Obserwator siedzący obok prawej ściany zobaczy foton biegnący w prawo i trafiający w ścianę. Jeżeli zmierzy częstotliwość tego fotonu, to okaże się, że jest ona większa od częstotliwości, z jaką foton został wyemitowany ze względu na efekt Dopplera, z którym zapoznałeś się w poprzednich rozdziałach. Po drugiej stronie laboratorium obserwator siedzący obok lewej ściany zobaczy foton

biegnący w lewo i trafiający w lewą ścianę. Jeżeli zmierzy częstotliwość tego fotonu, to okaże się, że jest ona przesunięta ku czerwieni, ponieważ cząstka, która wyemitowała foton, oddala się od lewej ściany. Foton o większej częstotliwości (przesuniętej ku fioletowi) niesie większy pęd niż foton o mniejszej częstotliwości (przesuniętej ku czerwieni). Zatem prawa ściana zostanie mocniej kopnięta (w prawo) niż ściana lewa (kopnięta w lewo). Nierówne kopnięcia się nie zniwelują i w rezultacie laboratorium jako całość otrzyma sumaryczne kopnięcie w prawo, czyli będzie miało niezerowy pęd skierowany w prawo. Zasada zachowania pędu musi być spełniona, jak zakładał Newton (w przeciwnym razie moglibyśmy konstruować rozmaite, niefizyczne, lewitujące urządzenia!), więc ten niezerowy pęd musi mieć jakieś źródło. Jedynym możliwym źródłem jest sama cząstka.



ILUSTRACJA 18.4. Diagram czasoprzestrzenny dla eksperymentu myślowego $E = mc^2$. Nieruchome ściany laboratorium mają pionowe linie świata. Cząstka porusza się od lewej do prawej z prędkością v, jej linia świata jest nachylona. Cząstka emituje jeden foton w lewo (jego grzbiety falowe poruszają się pod kątem 45° w kierunku lewego górnego rogu diagramu) oraz drugi foton w prawo (jego grzbiety falowe poruszają się pod kątem 45° w kierunku prawego górnego rogu diagramu). Laboratoryjny czas między emisjami dwóch kolejnych par grzbietów fal przez cząstkę wynosi $\Delta t'$ i jest

zaznaczony na diagramie jako pionowa przerywana linia. W tym czasie lewy grzbiet fali pokonuje odległość $c\Delta t'$ w lewo, natomiast cząstka pokonuje odległość $v\Delta t'$ w prawo; obie odległości są zaznaczone na diagramie. Długość fali (odległość dwóch kolejnych grzbietów) fotonu lecącego w lewo wynosi $\lambda_L = (c + v)\Delta t'$, na skutek przesunięcia Dopplera. Długość fali fotonu lecącego w prawo wynosi $\lambda_R = (c - v)\Delta t'$.

Credit: J. Richard Gott

Prędkość cząstki jest znacznie mniejsza od prędkości światła $v << c$, więc jej pęd można w przybliżeniu zapisać według wzoru Newtona: $P = mv$. Laboratorium zyskało pęd (w prawo), więc cząstka musiała stracić pęd. Linia świata cząstki nie jest zakrzywiona — jest prosta (co widać na diagramie czasoprzestrzennym na il. 18.4), więc jej prędkość nie uległa zmianie. Jeżeli pęd cząstki mv się zmniejszył, a jej prędkość v nie uległa zmianie, to jej masa m musiała się zmniejszyć. Cząstka oddała trochę energii (w postaci dwóch fotonów) i straciła trochę masy. Utracona część jej masy została zamieniona w energię. To jest to! To bardzo śmiałe twierdzenie. Pozostaje nam tylko policzyć, jaki jest związek między wyemitowaną energią i utraconą masą. W tym celu wystarczy obliczyć przesunięcia Dopplera dla obu fotonów. Sumaryczny pęd, jaki fotony przekazały laboratorium, wynosi $2h\nu_0(v/c^2)$. W dodatku 1 zamieściłem pełne wyprowadzenie wszystkich tych wzorów. Energia wyemitowana przez cząstkę w postaci dwóch fotonów wynosi $\Delta E = 2h\nu_0$, więc sumaryczny pęd, jaki fotony przekazały laboratorium, wynosi $\Delta E(v/c^2)$. Czynnik v/c^2 pochodzi od czynnika v/c, wynikającego z efektu Dopplera, oraz od czynnika $1/c$, wynikającego z relacji wiążącej pęd i energię fotonu. Sumaryczny pęd, jaki fotony przekazały laboratorium, $\Delta E(v/c^2)$, musi z kolei być równy pędowi, jaki utraciła cząstka: $(\Delta m)v$. Mamy zatem równanie $\Delta E(v/c^2) = (\Delta m)v$. Dzielimy obie strony równania przez v (prędkość cząstki się upraszcza!). Dostajemy $\Delta E/c^2 = \Delta m$. Mnożymy obie strony równania przez c^2. To daje $\Delta E = (\Delta m)c^2$. Symbol Δ po lewej stronie równania oznacza przyrost energii ΔE, symbol Δ po prawej stronie równania oznacza utratę masy Δm przez cząstkę, więc usuwamy symbole Δ po obu stronach i dostajemy $E = mc^2$.

W tym eksperymencie cząstka traci trochę energii, emitując dwa fotony, i traci część masy. Cząstka, która traci masę, emituje energię. Wzór $E = mc^2$ wiąże wyemitowaną energię z utraconą masą. To jest tak prosty i zarazem tak potężny wzór. Czynnik c^2 występuje w nim, ponieważ światło gra główną rolę w efekcie Dopplera oraz w związku między energią i pędem fotonu, a c jest prędkością światła.

Jak wiadomo, w normalnych jednostkach c jest bardzo dużą liczbą (300 000 km/s, a w jednostkach układu SI 300 000 000 m/s), dzięki czemu mała ilość masy może być zamieniona w olbrzymią ilość energii. Prawa Newtona mówią, że energia kinetyczna ciężarówki wynosi $\frac{1}{2}mv^2$, gdzie m jest masą ciężarówki, a v jej prędkością. Ten wzór daje poprawny (w przybliżeniu) wynik pod warunkiem, że $v << c$. Prędkość ciężarówki jadącej z prędkością 100 mil na godzinę (160 kilometrów na godzinę) wynosi 0,045 km/s (to zaledwie $0{,}00000015c$). Jeżeli dwie ciężarówki jadące z taką prędkością zderzą się czołowo, to cała ta energia kinetyczna — $2 \times (\frac{1}{2}mv^2)$ — zostanie

uwolniona w formie gigantycznej eksplozji. Fragmenty obu ciężarówek będą fruwały dookoła. Ale teraz wyobraźmy sobie, że ciężarówka zbudowana z materii zderzy się z ciężarówką zbudowaną z antymaterii. To byłby skrajny przypadek — te dwie ciężarówki anihilują się wzajemnie, zamieniając całą swoją masę w energię. W wyniku tej eksplozji uwolniona zostanie energia $2 \times (mc^2)$, o wiele więcej, niż mv^2 normalnych ciężarówek. O ile więcej? O czynnik $2/(0{,}00000015)^2 = 89$ bilionów! Anihilacja materii i antymaterii uwolniłaby 89 bilionów razy więcej energii niż czołowe zderzenie dwóch ciężarówek jadących z prędkością 100 mil na godzinę. W zwykłej materii ukryta jest ogromna ilość energii.

Na tym polega cała tajemnica bomby atomowej. Gdy atom uranu lub plutonu ulega rozszczepieniu, produkty rozpadu mają łącznie nieco mniejszą masę niż atom miał przed rozpadem. W rezultacie zostaje uwolniona olbrzymia ilość energii. W Słońcu zachodzi reakcja jądrowa, w wyniku której cztery jądra wodoru łączą się, tworząc jądro helu, o masie nieco mniejszej niż łączna masa czterech jąder wodoru. Ta różnica stanowiła źródło energii Słońca przez ostatnie 4,6 miliarda lat. Chemicy wykonali dokładne pomiary masy wielu izotopów dla większości pierwiastków, dzięki którym znamy niewielkie różnice masy na nukleon dla różnych pierwiastków. W rezultacie możemy obliczyć, ile energii można wyprodukować, dokonując fuzji lekkich pierwiastków lub rozszczepiając ciężkie. Żelazo ma najmniejszą masę w przeliczeniu na jeden nukleon, dlatego nie może być źródłem energii jądrowej, jak wspomnieliśmy w rozdziale 7.

Einstein zdawał sobie sprawę, wraz z innymi fizykami, że jedną z konsekwencji jego równania jest możliwość zbudowania bomby atomowej opartej na reakcji rozszczepienia ciężkich jąder[9]. Einstein napisał list do prezydenta Franklina D. Roosevelta, datowany 2 sierpnia 1939 roku, w którym sugerował, że USA powinny zbudować bombę atomową, zanim zrobi to Hitler. W ten sposób powstał Projekt Manhattan, w ramach którego fizycy (amerykańscy oraz uchodźcy z Europy) zbudowali działającą bombę atomową. Jak się później okazało, Niemcy także mieli program budowy bomby atomowej, czego obawiał się Einstein, lecz nie zdołali go zrealizować. Pierwsza, testowa amerykańska bomba atomowa została zdetonowana na poligonie w Nowym Meksyku już po kapitulacji Niemiec. Ostatecznie dwie bomby zostały zrzucone na Hiroszimę i na Nagasaki w Japonii, która skapitulowała kilka dni później, co zakończyło drugą wojnę światową. Konsekwencje były przerażające: około 200 tysięcy ludzi zginęło w wyniku eksplozji bomb oraz ekspozycji na promieniowanie. Robert Oppenheimer, dyrektor naukowy Projektu Manhattan, powiedział później, że test bomby przypomniał mu wers z *Bhagavadgity*: „now I become Death destroyer of worlds" (teraz stałem się Śmiercią, niszczycielem światów). Prezydent Truman wziął na siebie pełną odpowiedzialność za decyzję użycia bomb. Uważał, że było to konieczne, aby zakończyć drugą wojnę światową tak szybko, jak to możliwe, lecz powiedział także: „zdaję sobie sprawę z tragicznych konsekwencji bomby atomowej". Wiele lat później w prywatnej

bibliotece Trumana znaleziono książkę na temat bomby atomowej, w której podkreślone były słowa z ostatniej mowy Horatia w *Hamlecie*:

> And let me speak to th' yet unknowing world
> How these things came about. So shall you hear
> Of carnal, bloody, and unnatural acts,
> Of accidental judgments, casual slaughters,
> Of deaths put on by cunning and forced cause,
> And, in this upshot, purposes mistook
> Fall'n on th' inventors' heads. All this can I
> Truly deliver.
>
> ...mnie zaś
> Pozwólcie i wszem wobec, i każdemu
> Nieświadomemu prawdy opowiedzieć,
> Jak się to stało. Przyjdzie wam usłyszeć
> O czynach krwawych, wszetecznych, wyrodnych,
> O chłostach trafu, przypadkowych mordach,
> O śmierciach skutkiem zdrady lub przemocy,
> O mężobójczych planach, które spadły
> Na wynalazcy głowę[10].

Po wojnie Einstein aktywnie uczestniczył w działaniach na rzecz nuklearnego rozbrojenia.

Rozmyślając o podróżowaniu z prędkościami podświetlnymi, bardzo odległym od praktycznej realizacji w jego czasach, Einstein odkrył jednak zasadę, która zmieniła bieg historii. Prace Einsteina z cudownego roku (*annus mirabilis*) 1905 wyniosły go do najwyższej kategorii uczonych, na równi z Marią Curie i Maxem Planckiem, lecz jego największe dzieło było jeszcze przed nim.

19 – Ogólna teoria względności Einsteina

J. Richard Gott

Największym osiągnięciem Einsteina była ogólna teoria względności, teoria zakrzywionej czasoprzestrzeni, która zastąpiła Newtonowską teorię grawitacji.

Einstein rozważał następujący problem. Jeżeli równocześnie upuszczę dwie kule, ciężką i lekką, to równocześnie spadną na podłogę. Wiedział o tym Galileusz. Co powiedziałby Newton? Stwierdziłby, że grawitacyjna siła, z jaką Ziemia przyciąga kulę, wynosi $F = Gm_{kula}M_e/r_e^2$. Stwierdziłby także, że $F = m_{kula}a_{kula}$, więc przyspieszenie kuli a_{kula} jest równe sile działającej na kulę podzielonej przez masę kuli. Łącząc te dwa równania, dostajemy $a_{kula} = GM_e/r_e^2$. Masa kuli nie występuje we wzorze na przyspieszenie, co

oznacza, że obie kule, ciężka i lekka, muszą spadać w tym samym tempie. Newton powiedziałby, że na cięższą kulę działa wprawdzie większa siła grawitacji przyciągająca kulę do Ziemi, ale cięższą kulę jest trudniej przyspieszyć (cięższa kula ma większą bezwładność), ponieważ F = ma. W obu tych stwierdzeniach istotna jest masa kuli, więc większą siłę skompensuje odpowiednio większa bezwładność kuli. W rezultacie przyspieszenie obu kul będzie dokładnie takie samo. W teorii Newtona równość przyspieszeń wynika z faktu, że masa, która występuje we wzorze na siłę grawitacji (masa grawitacyjna) jest identyczna jak masa, która występuje we wzorze $F = ma$ (masa inercjalna).

To mogłaby być interesująca koincydencja, ale Einstein podszedł inaczej do tego zagadnienia. Rozważał, co stałoby się, gdyby ten sam eksperyment przeprowadzono w statku kosmicznym przyspieszającym w pustej przestrzeni międzygwiezdnej, gdzie nie ma grawitacji (jak w rakiecie przyspieszającej dzięki anihilacji materii i antymaterii, opisanej przez Neila w rozdziale 10). Jeżeli w nieruchomym statku upuścisz dwie kule, będą po prostu wisieć obok siebie w stanie nieważkości. Gdy jednak statek odpali silniki i zacznie przyspieszać, podłoga kabiny będzie przyspieszać i uderzy obie wiszące swobodnie kule. Obie kule równocześnie uderzą o podłogę, ponieważ one tylko wiszą swobodnie w stanie nieważkości, natomiast podłoga się zbliża i uderza w nie. Proste. Tu już nie jest koincydencją fakt, że obie kule trafiają w podłogę w tym samym momencie. A teraz załóżmy ponownie, że upuszczamy obie kule na Ziemi, ale tym razem spróbuj sobie wyobrazić, że one wiszą swobodnie, a podłoga przyspiesza w górę i uderza w nie[11]. Wszyscy wiedzieli, że eksperyment na przyspieszającym statku wygląda tak samo, jak wyglądałby na Ziemi, ale w 1907 roku Einstein stwierdził, że jeżeli eksperyment na przyspieszającym statku wygląda tak jak działanie grawitacji, to musi to być grawitacja. Nazwał to zasadą równoważności — i uważał za najszczęśliwszą myśl swojego życia. Jeżeli dwa różne zjawiska wyglądają tak samo, to są nierozróżnialne i muszą być tym samym zjawiskiem. To kolejne śmiałe stwierdzenie.

Einstein już wcześniej przeprowadził podobne rozumowanie. Ładunek elektryczny poruszający się w pobliżu magnesu jest przyspieszany przez pole magnetyczne, a stacjonarny ładunek jest tak samo przyspieszany, jeżeli magnes porusza się obok ładunku. W drugim przypadku, zgodnie z równaniami Maxwella, za przyspieszenie ładunku odpowiedzialne było pole elektryczne wytwarzane przez zmieniające się pole magnetyczne. Einstein wydedukował, że te dwa zjawiska muszą być identyczne i że istotny jest tylko ruch względny. Wynikał z tego wniosek, że pojęcia pola elektrycznego i pola magnetycznego jako odrębnych bytów powinny zostać zastąpione przez jedno pojęcie: pole elektromagnetyczne. Na tej samej zasadzie Einstein odkrył, że pojęcia przestrzeni i czasu jako odrębnych bytów powinny zostać zastąpione przez jedno pojęcie: czterowymiarową czasoprzestrzeń. Przełomowe momenty w nauce często zdarzają się wtedy, gdy ktoś uświadomi sobie, że dwie różne rzeczy są w istocie tożsame. Newton uświadomił sobie, że ta sama siła, która powoduje upadek jabłka, utrzymuje Księżyc na orbicie. Arystoteles

wiedział, że grawitacja powoduje upadek jabłka na Ziemię, lecz sądził, że coś innego, jakaś pozaziemska siła utrzymuje Księżyc na orbicie. Newton uświadomił sobie, że te dwa zjawiska są w istocie tożsame.

Einstein miał ogromne zaufanie do swojej zasady równoważności. Jeżeli upuścisz ciężką i lekką kulę, to one wiszą swobodnie obok siebie, a powierzchnia Ziemi przyspiesza w górę i uderza je równocześnie. Jedyny problem polegał na tym, że to nie miało sensu. W jaki sposób powierzchnia Ziemi mogłaby wszędzie przyspieszać w górę, skoro Ziemia wcale nie staje się większa? Gdyby rozszerzała się jak balon, mogłaby zagarniać te kule, które upuszczamy, ale Ziemia nie staje się ani trochę większa, więc wydaje się, że ten pomysł jest bez sensu. Mógłby mieć sens jedynie wtedy, gdybyśmy mieli zakrzywioną czasoprzestrzeń, gdzie prawa euklidesowej geometrii nie mają zastosowania.

Rozważmy krzywiznę powierzchni Ziemi. Na ilustracji 19.1 przedstawiony jest globus. Jego powierzchnia jest zakrzywiona, więc prawa euklidesowej geometrii nie mają na tej powierzchni zastosowania. Euklides mówi, że na płaszczyźnie suma kątów dowolnego trójkąta wynosi 180°. Najprostsza (najbardziej prosta) linia, jaką możesz narysować na globusie, to okrąg wielki — najkrótsza droga łącząca dowolne dwa punkty. Koło wielkie to największe koło, jakie da się wpisać w kulę. Jego środek pokrywa się ze środkiem kuli, a brzeg koła wielkiego (okrąg wielki) leży na powierzchni kuli. Równik Ziemi jest okręgiem wielkim. Każdy południk jest okręgiem wielkim. Najkrótsza droga z Nowego Jorku do bieguna północnego prowadzi wzdłuż południka łączącego Nowy Jork z biegunem północnym. Na globusie możemy narysować trójkąt, którego wierzchołkami są biegun północny oraz dwa punkty na równiku odległe o 90°. Utworzymy w ten sposób trójkąt (złożony z segmentów należących do trzech okręgów wielkich), w którym każdy z trzech wierzchołków ma 90°, co łącznie daje 270°.



ILUSTRACJA 19.1. Trójkąt z trzema kątami prostymi na sferze

Photo credit: J. Richard Gott

Jeżeli wyruszysz z bieguna północnego na południe i dotrzesz do punktu na równiku, będziesz musiał skręcić o 90°, a następnie będziesz podążał wzdłuż równika na zachód. Gdy dotrzesz do drugiego punktu na równiku, będziesz musiał ponownie skręcić o 90°, a następnie będziesz podążał na północ, w kierunku bieguna. Gdy dotrzesz na biegun, zobaczysz, że dwa boki trójkąta, które spotykają się w wierzchołku na biegunie, tworzą kolejny kąt 90°, ponieważ są to południki oddalone na równiku o 90°. Narysowałeś trójkąt z trzema kątami prostymi, co byłoby niemożliwe w geometrii euklidesowej. Powierzchnia kuli (sfera) jest zakrzywiona i nie zachowuje się jak płaska powierzchnia euklidesowa.

Wyobraź sobie, że rysujesz na globie okrąg, którego środek znajduje się na biegunie północnym, a sam okrąg pokrywa się z równikiem. Promień tego okręgu, mierzony wzdłuż powierzchni Ziemi, jest równy odległości od bieguna do równika, czyli 1/4 obwodu Ziemi. Obwód twojego okręgu jest równy obwodowi Ziemi mierzonemu wzdłuż równika. Zatem promień okręgu jest równy 1/4 obwodu okręgu. Czyli w tym przypadku stosunek obwodu okręgu do promienia wynosi 4, a nie 2π, jak spodziewalibyśmy się w geometrii euklidesowej. Jest to kolejny dowód, że na zakrzywionej powierzchni sfery prawa euklidesowej geometrii nie mają zastosowania.

Einstein rozważał sytuację mrówki, która stoi na wirującej płycie gramofonowej. Jeżeli stoi w pewnym oddaleniu od środka płyty, musi się mocno trzymać, aby pozostać na płycie. Jeżeli się trzyma, to podlega przyspieszeniu dośrodkowemu i zarazem odczuwa „grawitacyjną” siłę działającą od środka. Niektóre atrakcje w parkach rozrywki (centryfuga, żyroskop, wirówka) mogą generować taki sam efekt; znajdujesz się wewnątrz wirującego walca, czujesz siłę dociskającą cię do cylindrycznej ściany, nie możesz nawet podnieść stopy z podłogi. W obu przypadkach — wirującej płyty i wirującej centryfugi w parku rozrywki — siła odśrodkowa w ruchu kołowym naśladuje grawitację, podobnie jak siła bezwładności w przyspieszającym statku kosmicznym. Zakładamy, że płyta gramofonowa jest płaska, ale Einstein wiedział, że skoro zewnętrzna krawędź płyty porusza się bardzo szybko, umieszczone na niej pręty pomiarowe będą miały różne rozmiary w zależności od tego, czy pomiaru dokonają obserwatorzy siedzący na krawędzi wirującej płyty czy obserwatorzy siedzący nieruchomo na środku płyty. Obwód płyty, zmierzony przez obserwatorów siedzących na wirującym dysku, będzie się różnił od obwodu, którego oczekujemy w płaskiej geometrii euklidesowej, czyli promień razy 2π. Einstein wydedukował, że geometria wirującej płyty gramofonowej będzie nieeuklidesowa (będzie miała krzywiznę), ponieważ płyta wiruje, a wirująca płyta symuluje grawitację[12]. Jeżeli taka symulowana grawitacja jest grawitacją (zgodnie z zasadą równoważności Einsteina), to zakrzywienie czasoprzestrzeni może samo w sobie stanowić grawitację.



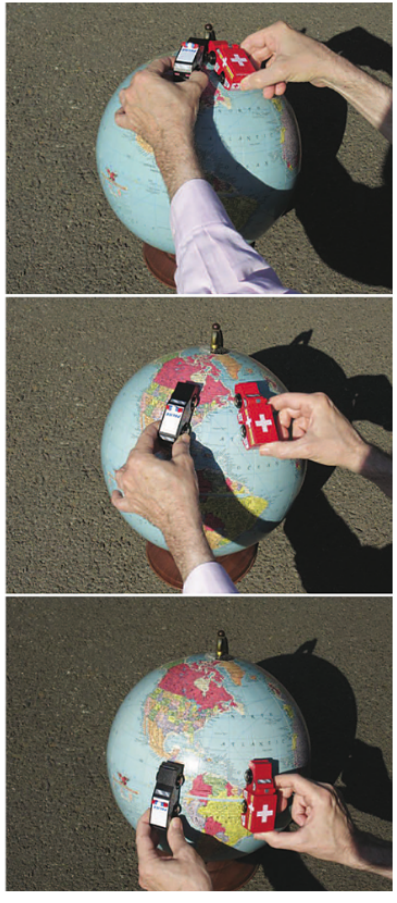
ILUSTRACJA 19.2. Trasa wzdłuż okręgu koła wielkiego, łącząca Nowy Jork i Tokio

Photo credit: J. Richard Gott

Jeżeli jestem w Nowym Jorku i chcę lecieć do Tokio, powinienem wybrać trasę wzdłuż okręgu koła wielkiego, która jest najkrótszą trajektorią. Mogę na globusie rozciągnąć nitkę między tymi dwoma miastami. Trasa wzdłuż okręgu wielkiego prowadzi przez północną Alaskę (il. 19.2). Weź globus i spróbuj sam. Taką trasę wybrałby samolot. Jest to także najprostsza możliwa trasa między tymi dwoma miastami. Możesz to zademonstrować, biorąc mały model ciężarówki i jadąc nim po globusie z jednego miasta do drugiego: ustaw prosto przednie koła, ustaw ciężarówkę w kierunku Tokio i po prostu przejedź wzdłuż okręgu wielkiego, przez północną Alaskę, aż do celu. Taka najprostsza możliwa trasa nazywa się linią geodezyjną lub geodetyką. Ustaw ciężarówkę na równiku w kierunku zachodnim, jedź ciągle prosto, a przejedziesz cały równik. Startując w dowolnym kierunku i cały czas jadąc prosto, będziesz się poruszał wzdłuż trasy geodezyjnej. Jeżeli natomiast popatrzysz na mapę Ziemi, wykonaną w rzucie Merkatora, to przekonasz się, że geodezyjny okrąg wielki łączący Nowy Jork i Tokio wcale nie jest linią prostą — wygląda jak krzywa. Oba miasta leżą mniej więcej na szerokości geograficznej 40°, więc mogłoby się wydawać, że najlepsza trasa do Tokio prowadzi prosto na zachód, wzdłuż równoleżnika 40°, ale w rzeczywistości, na globusie, ta trasa jest dłuższa i nie jest prosta. Ten równoleżnik jest okręgiem o obwodzie mniejszym od obwodu równika, a jego środek (położony wewnątrz Ziemi) leży na północ od środka Ziemi. Równoleżnik nie jest okręgiem wielkim. Granica między USA i Kanadą na zachód od Wielkich Jezior jest segmentem takiego małego okręgu. Gdybyś jechał ciężarówką wzdłuż tej granicy w kierunku na wschód, musiałbyś trzymać kierownicę skręconą nieznacznie w lewo, aby utrzymać się na drodze. Prosta linia geodezyjna na globusie przeniesiona na płaską mapę Ziemi może — w zależności od wybranego układu współrzędnych (odwzorowania kartograficznego) — wcale nie być prosta, lecz wyraźnie zakrzywiona.

Gdy rzucasz piłką koszykową do kosza, piłka leci po łuku najpierw w górę, potem w dół, aż trafi do celu. Wydaje się, że piłka wybiera zakrzywioną trajektorię — parabolę. Zakrzywioną w całkiem widoczny sposób — o kilka stóp. Trajektoria piłki w powietrzu jest zakrzywiona, podobnie jak geodezyjna

trasa z Nowego Jorku do Tokio jest zakrzywiona na mapie Merkatora. Pomysł Einsteina polegał na tym, że obiekty spadające swobodnie — tak jak ta piłka — poruszają się wzdłuż linii geodezyjnych w zakrzywionej czasoprzestrzeni, czyli wzdłuż najprostszych możliwych do wyboru trajektorii (przy założeniu, że nie działają na nie inne siły, na przykład siły elektromagnetyczne). Instrukcja dla cząstki jest prosta — po prostu podążaj prosto przed siebie. Nie musisz dodawać wektorów sił pochodzących od różnych mas i skierowanych w różnych kierunkach, jak życzyłby sobie Newton. Po prostu leć prosto. Czasoprzestrzeń jest zakrzywiona, a zakrzywienie tworzy grawitację. Rzuć okiem na diagram czasoprzestrzenny na ilustracji 18.1, z linią świata Słońca w postaci pionowego pręta i linią świata Ziemi w postaci helisy nawiniętej na pręt. W rzeczywistości jest to bardzo wysoka helisa. Jej promień wynosi 8 minut świetlnych, a odległość kolejnych zwojów to jeden rok świetlny. Według Einsteina masa Słońca nieznacznie zakrzywia czasoprzestrzeń wokół Słońca, co powoduje, że helikalna linia świata Ziemi jest najprostszą możliwą trajektorią w tej zakrzywionej czasoprzestrzeni, podobnie jak linia geodezyjna jest najprostszą możliwą trajektorią dla ciężarówki jadącej po globusie do Tokio. W układzie współrzędnych ilustracji 18.1 linia świata Ziemi wygląda, jakby była zakrzywiona, ale w rzeczywistości w zakrzywionej czasoprzestrzeni jest najprostszą możliwą geodezyjną trajektorią. Gdybyś znał krzywiznę czasoprzestrzeni w sąsiedztwie Słońca, mógłbyś obliczyć geodezyjną trasę, którą Ziemia podąża wokół Słońca.



ILUSTRACJA 19.3. Ciężarówki podróżujące na północ ze względu na krzywiznę globusa zbliżają się do siebie i zderzają się na biegunie północnym

Photo credit: J. Richard Gott

W taki sposób Einstein zamierzał wyjaśnić grawitację. Gdybyś w przestrzeni międzygwiezdnej umieścił dwie nieruchome masy, Newton stwierdziłby, że zaczną przyspieszać i zbliżać się do siebie, aż w końcu się zderzą, ponieważ działają na siebie na odległość siłami grawitacji, a te siły ciągną je ku sobie. Einstein mówi, że dwie masy zakrzywiają wokół siebie czasoprzestrzeń, a w tej zakrzywionej geometrii te dwie cząstki po prostu poruszają się wzdłuż najprostszych możliwych trajektorii, które zbliżają je do siebie.

Przypuśćmy, że dwa modele ciężarówek stoją na równiku w pewnej odległości od siebie i są skierowane prosto na północ (il. 19.3, zdjęcie dolne). Ciężarówki startują równolegle i jadą w kierunku bieguna. Początkowo ani się nie zbliżają, ani nie oddalają się od siebie, ale nie pozostaną na równoległych trajektoriach, ponieważ powierzchnia Ziemi jest zakrzywiona. Obie ciężarówki poruszają się prosto na północ, każda wzdłuż swojego południka (który jest linią geodezyjną). Początkowo jadą równolegle, ale w miarę jak oddalają się od równika, zaczynają dryfować ku sobie i zderzą się, gdy dotrą do bieguna północnego.

Einstein mówi, że masy cząstek powodują zakrzywienie czasoprzestrzeni podobne do zakrzywienia powierzchni Ziemi. Kierunek „północny” jest odpowiednikiem czasu biegnącego ku przyszłości. Południki, wzdłuż których poruszają się ciężarówki, odpowiadają ich liniom świata. Najprostsze możliwe linie świata dwóch cząstek zbliżają się do siebie, ponieważ czasoprzestrzeń jest zakrzywiona. Gdybyś ustawił modele ciężarówek równolegle na płaskiej powierzchni biurka, poruszałyby się równolegle, a ich linie geodezyjne byłyby jednakowo oddalone. W teorii Einsteina grawitacyjne przyciąganie jest spowodowane przez zakrzywienie czasoprzestrzeni.

Masa i energia powodują zakrzywienie czasoprzestrzeni — ale jak? Gdy Einstein zaczął rozwijać tę ideę, zapytał jednego ze swoich przyjaciół, matematyka Marcela Grossmanna: „Czy będę musiał przestudiować tensory krzywizny Riemanna?”. Grossmann odrzekł: „Obawiam się, że tak”. Bernhard Riemann opracował teorię krzywizny w przestrzeniach wielowymiarowych. Riemann robił doktorat pod kierunkiem jednego z najwybitniejszych matematyków, Carla Friedricha Gaussa. Gauss między innymi pracował nad teorią krzywizny przestrzeni dwuwymiarowych (krzywizny Gaussa), takich jak powierzchnia Ziemi. Gauss zaproponował Riemannowi, aby znalazł dla siebie trzy możliwe tematy doktoratu. Gauss wybrał trzecią sugestię Riemanna, czyli krzywiznę w przestrzeniach wielowymiarowych. Praca doktorska Riemanna była wybitnym osiągnięciem[13]. Riemann udowodnił, że do opisu krzywizny w przestrzeniach wielowymiarowych potrzebne jest matematyczne pojęcie, które obecnie nazywamy tensorem krzywizny Riemanna: $R^{\alpha}{}_{\beta\gamma\delta}$. W czterech wymiarach był to matematyczny potwór zawierający 256 składowych[14]. Na szczęście wiele składowych się powtarza, co efektywnie redukuje liczbę niezależnych składowych do dwudziestu — nadal bardzo dużo. Einstein musiał opanować matematyczny formalizm Riemanna, aby odkryć równania dla pola grawitacyjnego, analogiczne do równań Maxwella dla pola elektrycznego i magnetycznego. W jaki sposób energia i masa zakrzywiają czasoprzestrzeń? Jakie geometrie są możliwe?

Teoria Einsteina musiałaby odpowiedzieć na takie fundamentalne pytania. Dla niewielkich prędkości i niewielkich zakrzywień musiałaby także być w przybliżeniu zgodna z teorią Newtona, ponieważ teoria Newtona działa całkiem nieźle przy tych założeniach.

Einstein pracował nad tym zagadnieniem od 1907 do 1915 roku. Matematyczne struktury, które musiał opanować, były rzeczywiście bardzo złożone, ale Einstein nigdy się nie poddał. Po wielu próbach, błędach i wielu ślepych uliczkach pod koniec 1915 roku odkrył poprawne równania pola. W odpowiednich jednostkach (w których stała Newtona G i prędkość światła c są równe 1) równania Einsteina wyglądają następująco:

$$R_{\mu\nu} - \tfrac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}.$$

Prawa strona równania reprezentuje przyczynę („źródło") krzywizny czasoprzestrzeni — wszystkie „rzeczy" (ang. *stuff*), czyli wszystkie obiekty materialne oraz ich właściwości, takie jak masa, energia i pęd cząstek, ciśnienie cieczy lub gazu, promieniowanie elektromagnetyczne oraz jego energię i pęd; lewa strona określa, w jaki sposób czasoprzestrzeń jest zakrzywiona[15]. Masa i energia mówi czasoprzestrzeni, jak ma być zakrzywiona. W ten sposób Einstein pozbył się tajemniczego „działania na odległość" w teorii Newtona. Wszystkie „rzeczy materialne" w danym położeniu powodują, że czasoprzestrzeń zakrzywia się w określony przez równania sposób w tym położeniu. Cząstki, planety, ciężarówki dostają swoje instrukcje lokalnie — zawsze i wszędzie mają podążać prosto w zakrzywionej czasoprzestrzeni. Wyprowadzenie tych równań to był długi i mozolny proces. Początkowo Einstein sądził, że w równaniach powinny być tylko dwa elementy: $R_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$. Co ciekawe, równania w tej postaci były poprawne dla pustej przestrzeni. Pusta przestrzeń nie zawiera „rzeczy", więc Einstein sądził, że $T_{\mu\nu} = 0$ w pustej przestrzeni. W ten sposób wydedukował, że w pustej przestrzeni krzywizna pustej przestrzeni jest zerowa, czyli że spełnione jest także równanie $R_{\mu\nu} = 0$. Ale gdyby w pustej przestrzeni spełnione było równanie $R_{\mu\nu} = 0$, to skalar R (który wylicza się ze składowych tensora $R_{\mu\nu}$) byłby także równy zeru, i w rezultacie ostateczne, poprawne równania z 1915 roku ($R_{\mu\nu} - \tfrac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$), czyli z dodatkowym członem $-\tfrac{1}{2}Rg_{\mu\nu}$ byłyby także spełnione w pustej przestrzeni, ponieważ dodatkowy człon byłby równy zeru w przypadku pustej przestrzeni. Początkowo Einstein miał wprawdzie błędne równania pola, ale tak się szczęśliwie złożyło, że były poprawne dla przypadku pustej przestrzeni.

Einstein wykonał pewne obliczenia, stosując swój wzór. Obliczył krzywiznę przestrzeni wokół Słońca, a następnie linię geodezyjną reprezentującą linię świata planety (helisę z il. 18.1). Odkrył przy tym, że planety nie poruszają się wzdłuż zwykłych eliptycznych orbit, jak przewidywał Kepler, lecz wzdłuż elips, które precesują (czyli powoli rotują). Planeta nie podąża po własnych śladach za każdym kolejnym okrążeniem, ponieważ jej elipsa powoli rotuje, czyli obraca się (w płaszczyźnie elipsy). Dla większości planet położonych dalej od Słońca ten efekt był bardzo mały, lecz dla Merkurego, który krąży

najbliżej Słońca, gdzie krzywizna jest największa, efekt okazał się mierzalny. Einstein obliczył, że orbita Merkurego precesuje, czyli obraca się o 43 sekundy kątowe na stulecie. Eureka! To było tyle, ile wynosiła niewyjaśniona precesja orbity Merkurego zmierzona przez astronomów, o której Einstein wiedział, a której teoria Newtona nie mogła wyjaśnić.

Einstein był tak podekscytowany tymi obliczeniami, że — jak powiedział — dostał palpitacji serca. Jego równania dały poprawny wynik — 43 sekundy kątowe na sto lat — natura przemówiła. Wykonał te obliczenia 18 listopada 1915 roku, gdy używał jeszcze niekompletnej wersji równań $R_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$, lecz w przypadku pustej czasoprzestrzeni wokół Słońca ta wersja była poprawna.

W tym samym dniu obliczył zakrzywienie promieni światła przechodzących w pobliżu Słońca, czyli linię geodezyjną, którą światło podąża w zakrzywionej, pustej czasoprzestrzeni w sąsiedztwie Słońca. Z obliczeń wynika, że wiązka światła pochodząca od odległej gwiazdy, przechodząca w pobliżu krawędzi Słońca, zostanie ugięta pod kątem 1,75 sekundy kątowej. To było dwa razy więcej, niż obliczyłby Newton, gdyby założył, że światło jest wiązką małych, masywnych kulek, podróżujących z prędkością 300 000 km/s. Wynik obliczeń Newtona wynosiłby 0,875 sekundy kątowej. Może jednak światło nie jest wiązką masywnych cząstek, więc w teorii Newtona byłoby również możliwe, że światło w ogóle nie ulega zakrzywieniu. Einstein nie miał jednak wyboru: w jego teorii światło musi podążać wzdłuż linii geodezyjnej i musi być ugięte pod kątem 1,75 sekundy kątowej. To ugięcie można zmierzyć. Jak można obserwować gwiazdy w pobliżu krawędzi Słońca? Trzeba poczekać na zaćmienie Słońca, gdy Księżyc zablokuje jasne światło emitowane przez powierzchnię Słońca. W trakcie zaćmienia należy zrobić zdjęcie i zmierzyć położenie gwiazd na płycie fotograficznej, a potem odczekać sześć miesięcy, gdy Ziemia będzie po drugiej stronie Słońca. Gdy Słońce będzie daleko od tych gwiazd, trzeba ponownie zrobić zdjęcie i następnie porównać obie fotografie. Zgodnie z równaniami Einsteina gwiazdy znajdujące się na pierwszej fotografii w pobliżu krawędzi Słońca powinny być przesunięte o 1,75 sekundy kątowej. Einstein zaproponował taki obserwacyjny eksperyment w trakcie zaćmienia Słońca jako test.

Einstein miał szczęście. Wcześniej, zanim wyprowadził swoje równania pola, opublikował artykuł, w którym przeprowadził jakościową analizę opartą na zasadzie równoważności w zastosowaniu do przyspieszającego statku kosmicznego. W przyspieszającym statku kosmicznym prosta, pozioma wiązka światła w międzygwiezdnej przestrzeni wygląda jakby była zakrzywiona, ponieważ w przyspieszającym statku wiązka w końcu uderzy w podłogę. Stosując zasadę równoważności, Einstein dowodził, że światło powinno także być zakrzywione przez grawitację. Argumentacja Einsteina poprawnie uwzględniała zakrzywienie w czasie, ale nie uwzględniała zakrzywienia w przestrzeni i w rezultacie Einstein otrzymał połowę poprawnej wartości kąta ugięcia. Uzyskał wynik równy 0,875 sekundy kątowej, taki sam, jaki dostałby Newton. Einstein opublikował tę pracę i zasugerował, aby ugięcie zostało zmierzone w trakcie zaćmienia w 1914 roku. Jednak w 1914 roku wybuchła pierwsza wojna światowa i ekspedycje nie wykonały żadnych obserwacji. Na

szczęście dla Einsteina. W 1915 roku Einstein miał już poprawny wynik: 1,75 sekundy kątowej dla zakrzywionej czasoprzestrzeni. Ten rezultat różnił się od tego, co przewidywała teoria Newtona. Gdyby ugięcie o 1,75 sekundy kątowej zostało zaobserwowane, Einstein miałby rację, a Newton byłby w błędzie. Gdyby ugięcie o 0,875 sekundy kątowej zostało zaobserwowane, wygrałby Newton, a Einstein byłby w błędzie. Gdyby zerowe ugięcie zostało zaobserwowane, Einstein byłby w błędzie, ale Newton nadal mógłby mieć rację, ponieważ mógłby argumentować, że masa przyciąga masę, ale masa nie przyciąga światła. W takim przypadku Newton nadal byłby w grze. Obliczenia Einsteina dla precesji Merkurego dotyczyły zjawiska, które wprawdzie nie zostało wyjaśnione na gruncie teorii Newtona, ale zostało wcześniej zaobserwowane, zanim Einstein wykonał swoje obliczenia. W przypadku ugięcia światła przez Słońce Einstein sformułował przewidywanie zjawiska, które wcześniej nie zostało zaobserwowane i obliczył wynik. To byłby decydujący test.

Dwie brytyjskie ekspedycje wyruszyły, aby wykonać obserwacje w trakcie zaćmienia w dniu 29 maja 1919 roku. Jedna z nich wykonała obserwacje w miejscowości Sobral w Brazylii, a druga na wyspie Príncipe w Zatoce Gwinejskiej przy zachodnim brzegu Afryki. Sir Arthur Eddington złożył raport i przedstawił wyniki na połączonym zebraniu Royal Society i Royal Astronomical Society w Londynie w dniu 6 listopada 1919 roku. Wynik z Sobral wynosił 1,98±0,30 sekundy kątowej; wynik z Príncipe wynosił 1,61±0,30 sekundy kątowej; oba zgadzały się z przewidywaniami Einsteina w granicach obserwacyjnego błędu 0,30 sekundy kątowej; oba wyniki nie zgadzały się z przewidywaniami teorii Newtona. Zebraniu przewodniczył J.J. Thomson, laureat nagrody Nobla, który ogłosił: „To jest najważniejszy wynik dotyczący teorii grawitacji od czasów Newtona (...) rezultat jednego z największych osiągnięć ludzkiej myśli".

Następnego dnia Einstein był na pierwszej stronie „London Timesa" pod tytułem „Rewolucja w nauce". Dwa dni później był w „New York Timesie". To był moment, w którym Einstein zmienił status: z jednego z najwybitniejszych uczonych swoich czasów stał się uczonym otoczonym światową sławą, celebrytą znanym w każdym zakątku świata. Dołączył do towarzystwa Isaaca Newtona.

Obserwacje ugięcia światła z 1919 roku zostały niebawem potwierdzone z większą dokładnością przez W.W. Campbella i R. Trumplera, którzy w 1922 roku obserwowali zaćmienie z Australii. Zmierzyli ugięcie równe 1,82±0,20 sekundy kątowej, również zgodne z obliczeniami Einsteina wynoszącymi 1,75 sekundy kątowej.

Einstein podsumował swoje wysiłki w latach 1907-1915, gdy próbował sformułować swoje równania: „Lata niespokojnych poszukiwań w ciemności, poszukiwań prawdy, którą się czuje, lecz nie można wyrazić, intensywne pragnienie, naprzemienne poczucie pewności i obawy, dopóki nie osiągnie się jasności i zrozumienia, mogą być zrozumiałe tylko dla kogoś, kto tego doświadczył"[16].

20 – Czarne dziury

J. Richard Gott

Ten rozdział jest o najbardziej tajemniczych obiektach we Wszechświecie — czarnych dziurach. Jedno z pierwszych dokładnych rozwiązań równań ogólnej teorii względności Einsteina dotyczyło czarnych dziur. Dokładne rozwiązanie równań Einsteina opisuje pewną geometrię czasoprzestrzeni, której zakrzywienie w każdym punkcie (lokalne zakrzywienie) spełnia te równania. Szczególnie interesujące jest rozwiązanie dla geometrii pustej przestrzeni wokół punktowej masy. Jest to tak zwane rozwiązanie dla próżniowych równań pola, ponieważ dotyczy pustej przestrzeni. Tego typu równania próbował rozwiązać Einstein, gdy zajmował się orbitą Merkurego lub ugięciem promieni światła w przestrzeni wokół Słońca. Dokładne rozwiązanie było bardzo trudnym zadaniem, ponieważ niełatwo było z góry odgadnąć geometrię rozwiązania, więc Einstein zdecydował się na przybliżone rozwiązanie, w którym założył, że przestrzeń jest w przybliżeniu płaska, tak jak w szczególnej teorii względności, natomiast zakrzywienie stanowiło małe zaburzenie (niewielkie odchylenie od całkowicie płaskiej czasoprzestrzeni). Rozwiązanie dla małych zaburzeń było łatwiejsze do znalezienia, ponieważ punktem wyjścia była płaska geometria, a równania dla niewielkich odchyleń od płaskiej geometrii były łatwiejsze do rozwiązania. Prędkość ciał krążących wokół Słońca jest mała w stosunku do prędkości światła, więc geometria przestrzeni wokół Słońca jest tylko nieznacznie zakrzywiona. Dlatego przybliżone rozwiązanie, a także wyniki uzyskane przez Einsteina dla orbity Merkurego i dla ugięcia światła w pobliżu Słońca, są dość dokładne. Einstein zapewne sądził, że dokładne rozwiązanie jest zbyt trudne; w każdym razie zadowolił się rozwiązaniem przybliżonym.

Pierwszą osobą, która znalazła dokładne rozwiązanie równań Einsteina w pustej przestrzeni wokół punktowej masy, był niemiecki astronom, Karl Schwarzschild. Znalazł on rozwiązanie przedstawiające grawitację na zewnątrz nieruchomej kulistej gwiazdy. Gdy w 1919 roku Arthur Eddington ogłosił wyniki obserwacji ugięcia światła przez Słońce, korespondent sportowy „New York Timesa", zapewne pod wpływem ogólnej euforii, wysłał z Londynu tekst, w którym sformułował wyssaną z palca tezę, że tylko dwanaście mądrych osób („12 wise men") rozumie ogólną teorię względności. Z pewnością było ich więcej, ale niezależnie od faktycznej liczby nie ma wątpliwości, że Karl Schwarzschild był jedną z tych osób. Schwarzschild już w 1900 roku opublikował artykuł o krzywiźnie przestrzeni — pięć lat przed opublikowaniem przez Einsteina szczególnej teorii względności. Schwarzschild sugerował, że przestrzeń może być dodatnio zakrzywiona jak powierzchnia sfery lub ujemnie zakrzywiona jak powierzchnia końskiego siodła. Próbował także oszacować, jak duży jest promień krzywizny przestrzeni, biorąc pod uwagę dostępne wówczas wyniki obserwacji astronomicznych. Gdy ukazał się artykuł Einsteina, Schwarzschild był mentalnie przygotowany do rozważania krzywizny czasoprzestrzeni,

natychmiast więc zrozumiał teorię Einsteina, i — co najważniejsze — znał i rozumiał rachunek tensorów krzywizny Riemanna. Dysponował wszystkimi matematycznymi narzędziami, których potrzebował, aby zrobić coś nowego i oryginalnego. Zdołał znaleźć rozwiązanie przedstawiające grawitację na zewnątrz nieruchomej kulistej gwiazdy, ponieważ w pomysłowy sposób wykorzystał fakt, że układ miał symetrię sferyczną oraz nie zależał od czasu, mógł więc użyć odpowiednio dobranego układu współrzędnych. Okazało się, że dokładne rozwiązanie równań Einsteina dla pustej przestrzeni wokół nieruchomej kulistej gwiazdy stanowi opis (przestrzeni na zewnątrz) czarnej dziury[17].

Służąc w armii w czasie pierwszej wojny światowej, Karl Schwarzschild nabawił się pewnej nietypowej choroby skóry, która okazała się śmiertelna; w 1916 roku został wysłany do domu, zapoznał się z artykułem Einsteina i znalazł swoje rozwiązanie. Wysłał rozwiązanie Einsteinowi, pisząc m.in., że w środku wojny miał przyjemność „spędzić trochę czasu w ogrodzie Pańskich idei". Schwarzschild zmarł kilka miesięcy później.

Wyprowadzenie dokładnego rozwiązania próżniowych równań pola przypomina szycie patchworkowego płaszcza z małych kawałków materiału. W każdym punkcie czasoprzestrzeni musisz zszyć kawałki w taki sposób, że lokalnie różne człony opisujące krzywiznę sumują się do zera. Równania określają reguły, w jaki sposób należy dodawać i zszywać kolejne kawałki, lecz na końcu musisz uzyskać globalne rozwiązanie — kompletny płaszcz — który spełnia reguły w każdym punkcie. To bardzo trudne. Karl Schwarzschild pierwszy znalazł dokładne rozwiązanie dla zakrzywionej przestrzeni wokół czarnej dziury.

Martin Schwarzschild, syn Karla Schwarzschilda, był przez wiele lat naszym kolegą na Uniwersytecie Princeton (zob. il. 8.3). Martin był także astronomem i pod wieloma względami poszedł w ślady ojca. Jednym z jego wielu ważnych dokonań było odkrycie, że takie gwiazdy jak Słońce staną się czerwonymi olbrzymami. Martin nie znał dobrze swego ojca, który zmarł, gdy Martin miał zaledwie cztery lata. Karl był niemieckim obywatelem i patriotą, więc w czasie pierwszej wojny światowej służył w armii niemieckiej, natomiast Martin był antyfaszystą i uciekł z Niemiec, gdy Hitler doszedł do władzy. Podczas drugiej wojny światowej walczył przeciwko Niemcom, służąc w wywiadzie armii USA.

Aby zrozumieć rozwiązanie Schwarzschilda dla czarnej dziury, powróćmy najpierw do Newtonowskiej grawitacji. Co się stanie, jeżeli rzucę do góry piłkę? Poleci w górę, zawróci i spadnie mi na głowę. Jest nawet takie przysłowie „What goes up must go down" („Co idzie w górę, musi wrócić w dół"; w wolnym tłumaczeniu „W życiu są wzloty i upadki"). Jedyny problem z tym przysłowiem polega na tym, że jest błędne. Pomijając opór powietrza, jeżeli rzucę do góry piłkę z dostatecznie dużą prędkością, większą niż prędkość ucieczki z powierzchni Ziemi, która wynosi około 11,2 kilometra na sekundę, piłka ucieknie z pola grawitacyjnego Ziemi i nigdy nie wróci. Statki Apollo musiały rozpędzić się niemal do takiej prędkości, aby dotrzeć do Księżyca. W teorii Newtona istnieje wzór na prędkość ucieczki: $v^2_{\text{es}} = 2GM/r$, gdzie G jest stałą grawitacji Newtona, M jest masą Ziemi, a r jest promieniem

Ziemi. Przypuśćmy teraz, że dysponuję ogromnym zgniataczem śmieci, który potrafi zgnieść planetę do mniejszych rozmiarów, jak kulę z papieru. Co wtedy stałoby się z prędkością ucieczki? Masa Ziemi nie zmieniłaby się, ale zmalałby promień, dzięki czemu wzrosłaby prędkość ucieczki z powierzchni Ziemi. Gdybym zatem zgniatał Ziemię do coraz mniejszych rozmiarów, w pewnym momencie prędkość ucieczki przekroczyłaby prędkość światła *c*. Jaki to rozmiar? Wystarczy podstawić do wzoru: $v^2_{es} = c^2 = 2GM/r$, rozwiązać równanie i otrzymamy $r = 2GM/c^2$. Na cześć Karla nazywamy tę wartość promieniem Schwarzschilda. Dla masy Ziemi promień Schwarzschilda wynosi 8,88 milimetra, czyli mniej więcej tyle co duży orzech laskowy. Jeżeli zgnieciesz Ziemię do rozmiarów mniejszych niż taki orzech, prędkość ucieczki będzie większa od prędkości światła i nic, nawet światło, nie będzie w stanie uciec. Einstein udowodnił, że nic nie może się poruszać szybciej od światła, więc jeżeli zgnieciesz Ziemię poniżej jej promienia Schwarzschilda, to nigdy nie powróci do pierwotnej postaci — stanie się czarną dziurą. Przymiotnik „czarna" odnosi się do faktu, że z wnętrza czarnej dziury nawet światło nigdy nie ucieknie. Masa będzie się zapadać do coraz mniejszych rozmiarów, jej własna grawitacja będzie ją wciągać coraz mocniej, jeszcze bardziej zwiększając prędkość ucieczki. Wewnątrz sfery Schwarzschilda grawitacja zdominuje wszystkie inne siły i masa zapadnie się do punktu, osobliwości o nieskończonej krzywiźnie w samym środku. Zgodnie z ogólną teorią względności ten punkt ma zerowe rozmiary, ale sądzimy, że efekty kwantowe spowodują jego rozmycie do rozmiaru wynoszącego około $1{,}6 \times 10^{-33}$ centymetra, zwanego długością Plancka (w rozdziale 24 wyjaśnimy, skąd pochodzi ta liczba). To znacznie mniej niż rozmiary jądra atomowego. Ostatecznie zostajemy z punktową masą w środku, o rozmiarach bliskich zeru, otoczoną przez pustą, zakrzywioną czasoprzestrzeń [18].

Gdybyś zamierzał wybrać się do wnętrza sfery Schwarzschilda, musisz się liczyć z tym, że nigdy nie wydostaniesz się na zewnątrz. Musiałbyś się poruszać szybciej od światła, a Einstein pokazał, że jest to niemożliwe.

Promień Schwarzschilda dla czarnej dziury jest proporcjonalny do jej masy. Im większa masa, tym większy promień. Zgniecenie Ziemi do jej promienia Schwarzschilda byłoby bardzo trudne, ale masywne gwiazdy, które wypaliły swoje jądrowe paliwo, mają gęsty rdzeń, któremu niewiele brakuje, aby się zapaść do sfery Schwarzschilda. Gdy Słońce umrze, stanie się czerwonym olbrzymem, a następnie odrzuci otoczkę, pozostawiając rdzeń w postaci białego karła o rozmiarach zbliżonych do Ziemi. Jeżeli rdzeń umierającej gwiazdy jest cięższy niż 1,4 masy Słońca, lecz lżejszy niż dwie masy Słońca, biały karzeł zapadnie się i powstanie gwiazda neutronowa o promieniu około 12 kilometrów. Promień gwiazdy neutronowej jest tylko dwa, trzy razy większy od jej promienia Schwarzschilda, więc jest dość blisko niebezpiecznej granicy. Gwiazda neutronowa o masie około dwóch mas Słońca staje się niestabilna (tzn. nie może istnieć przez dłuższy czas), zapada się poniżej własnego promienia Schwarzschilda, gdzie zaczyna dominować grawitacja, i powstaje czarna dziura. Promień Schwarzschilda czarnej dziury o masie dziesięciu mas Słońca, która może powstać pod koniec życia bardzo masywnej

gwiazdy, wynosi około 30 kilometrów. Supermasywna czarna dziura o masie 4 milionów mas Słońca, taka jak w centrum naszej Galaktyki, ma promień Schwarzschilda równy około 12 milionów kilometrów (nieco mniej niż 1/10 AU). Jedna z największych czarnych dziur, jakie znamy, znajduje się w centrum gigantycznej, eliptycznej galaktyki M87. Jej masa jest równa 3 miliardom mas Słońca, a promień 9 miliardom kilometrów, dwa razy więcej niż promień naszego Układu Słonecznego, aż po orbitę Neptuna.

Wyobraźmy sobie, że profesor i jego doktorant planują wycieczkę do wnętrza czarnej dziury Schwarzschilda o masie 3 miliardów mas Słońca. Profesor chce wiedzieć, co jest w środku, więc wysyła doktoranta do wnętrza, a sam pozostaje na zewnątrz. Odpala silniki rakiety, aby utrzymać pozycję w odległości, powiedzmy, 1,25 promienia Schwarzschilda. Dopóki pozostaje na zewnątrz, nic złego mu się nie przydarzy. Aby zbadać wnętrze czarnej dziury, odważny doktorant swobodnie opada w jej kierunku. AHHHHHH! W miarę opadania wysyła sygnały radiowe do profesora, aby go informować, jak sprawy się mają. Pierwsza część wiadomości brzmi: „SPRAWY”. Sygnał radiowy biegnie z prędkością światła.

Doktorant opada dalej, a sygnał dociera do profesora. Profesor odczytuje pierwsze słowo wiadomości: „SPRAWY”. W międzyczasie doktorant opada dalej i wysyła drugie słowo swojej wiadomości: „MAJĄ”. Ten sygnał, wysłany tuż powyżej sfery Schwarzschilda, także biegnie z prędkością światła, ale dotarcie do profesora zajmie mu dużo czasu. Profesor musi cały czas trzymać włączone rakiety, aby nie dać się wciągnąć, więc w rzeczywistości cały czas przyspiesza w kierunku od brzegu czarnej dziury, więc sygnałowi „MAJĄ” dużo czasu zajmie dotarcie do profesora.

W międzyczasie[19] doktorant przekracza sferę Schwarzschilda. Czy to dobra wiadomość? Nie. Czy wróci, aby obronić doktorat? Niestety, nie. Ale w miejscu, w którym przekracza granicę, za którą nie ma powrotu, nie stoją żadne ostrzegawcze znaki drogowe. Nic szczególnego się tam nie dzieje. Doktorant nawet nie wie, że coś złego się zdarzyło. Z jego punktu widzenia wszystko wygląda normalnie. W gruncie rzeczy, gdybyś w tej chwili przekraczał sferę Schwarzschilda jakiejś ogromnej czarnej dziury wraz z pomieszczeniem, w którym teraz czytasz tę książkę, mógłbyś w ogóle tego nie zauważyć. Lokalnie, niewielki obszar czasoprzestrzeni wygląda, jakby w przybliżeniu był płaski. Na podstawie lokalnych pomiarów nie da się wnioskować, jak wygląda globalne rozwiązanie. Tuż po przekroczeniu sfery Schwarzschilda doktorant wysyła trzecie słowo swojej wiadomości: „SIĘ”. Drugie słowo „MAJĄ”, jest nadal w drodze do profesora. Jak dotąd profesor otrzymał tylko pierwsze słowo — „SPRAWY”. Doktorant spada teraz w głąb sfery Schwarzschilda czarnej dziury. Sygnał niosący słowo „SIĘ” biegnie z prędkością światła, ale wygląda jak dziecko biegnące pod górę na jadących w dół ruchomych schodach. Na powierzchni sfery Schwarzschilda prędkość ucieczki jest równa prędkości światła, więc sygnał radiowy „SIĘ” pozostaje na powierzchni Schwarzschilda i nie posuwa się do przodu. Sygnał „MAJĄ” nadal podąża w kierunku profesora.

Doktorant nadal spada w głąb sfery Schwarzschilda. Jego stopy lecą pierwsze, więc są nieco bliżej centrum niż głowa. Grawitacja zależy od odległości jak $1/r^2$, więc siła przyciągania działa nieco mocniej na stopy i nieco słabiej na głowę niż na środkową część ciała. Jego głowa i nogi są ciągnięte w przeciwnych kierunkach przez tę siłę pływową, jak na średniowiecznym stole do tortur. Na dodatek, jego lewe ramię jest przyciągane w prawo, radialnie w kierunku środka ciała, a prawe ramię jest przyciągane w lewo, radialnie w kierunku środka ciała. Jego ramiona są coraz bliżej siebie, gdyż poruszają się wzdłuż linii zbiegających się w środku czarnej dziury. Doktorant czuje się, jakby był miażdżony w żelaznej dziewicy (urządzenie do tortur), więc wysyła ostatnie słowo swojej wiadomości: „ŹLE".

„SPRAWY MAJĄ SIĘ ŹLE". Gdy doktorant zbliża się do centrum, siły rosną. Jest ściskany z boków i rozciągany wzdłuż ciała, stopniowo zamieniając się w coś w rodzaju pojedynczej nitki spaghetti. Ten proces nazywa się spaghettifikacją. To naprawdę jest techniczne określenie, którego astronomowie używają w odniesieniu do tego procesu! W końcu doktorant zostaje rozerwany, zmiażdżony i zdeponowany w centralnym punkcie czarnej dziury. Jej masa wynosi teraz 3 miliardy mas Słońca plus masa doktoranta. Jej promień Schwarzschilda troszeczkę się powiększa. Sygnał „MAJĄ" wciąż podąża w kierunku profesora. Sygnał „SIĘ" nadal pozostaje na powierzchni sfery Schwarzschilda. Sygnał „ŹLE" biegnie z prędkością światła, ale w rzeczywistości wygląda jak dziecko biegnące pod górę na jadących w dół ruchomych schodach, które są szybsze. Dziecko biegnie w górę, ale przemieszcza się w dół. Sygnał „ŹLE", mimo że biegnie w górę, jest wciągany do środka, gdzie zostanie zmiażdżony i zdeponowany w osobliwości, w centralnym punkcie czarnej dziury.

W końcu, po bardzo długim czasie sygnał „MAJĄ" dociera do profesora. Profesor otrzymał pierwszą część wiadomości: „SPRAWY M... A... J... Ą", ale nigdy nie otrzyma reszty. Trzecia część, „SIĘ", utknęła na promieniu Schwarzschilda, a czwarta, „ŹLE", została wessana do osobliwości wraz ze swoim nadawcą. Sygnał „ŹLE" to wiadomość o zdarzeniu zachodzącym poniżej sfery Schwarzschilda. Ten sygnał nigdy nie dotrze do profesora, który nigdy się nie dowie, co się stało wewnątrz. Profesor nigdy nie zobaczy zjawisk, które zachodzą poniżej sfery Schwarzschilda, czyli wewnątrz horyzontu zdarzeń — granicy obszaru, który jest niedostępny dla obserwacji przez zewnętrznych obserwatorów. Profesor nie widzi zjawisk, które następują wewnątrz horyzontu zdarzeń — podobnie jak na Ziemi nie może zobaczyć zjawisk, które się dzieją za ziemskim horyzontem. Horyzont określa granicę tego, co można zobaczyć. Obserwator, który znajduje się poza horyzontem zdarzeń czarnej dziury, nigdy nie zobaczy zjawisk, które zachodzą wewnątrz horyzontu zdarzeń.

Jeżeli profesor chce wiedzieć, co się stało z jego doktorantem, może wyłączyć silniki swojej rakiety, które pozwalały mu unosić się nad horyzontem czarnej dziury, i wtedy sam zacznie swobodnie spadać. Gdy przekroczy horyzont zdarzeń, zobaczy sygnał „SIĘ", który tam utknął. Jadąc w dół „schodów", zobaczy jak sygnał „SIĘ" mija go z prędkością światła. Światło

zawsze mija go z prędkością 300 000 km/s. Ale wtedy profesor spadnie do środka czarnej dziury i zginie, podobnie jak jego doktorant.

W czarnej dziurze o masie 3 miliardów mas Słońca doktorant będzie miał 5,5 godziny — mierzone na jego zegarze — swobodnego spadku od horyzontu zdarzeń do momentu, gdy dotrze do centrum i zginie. Szczęśliwie dla niego proces spaghettifikacji od momentu, gdy siły pływowe zaczną go rozciągać, do całkowitej destrukcji, potrwa tylko przez ostatnie 0,09 sekundy jego podróży. Nieco krócej niż na średniowiecznych torturach.

Możemy także zadać sobie pytanie, jak wygląda zakrzywiona geometria czasoprzestrzeni na zewnątrz czarnej dziury. Zostałem kiedyś zaproszony do udziału w programie McNeil/Lehrer Newshour, ponieważ astronomowie używający Kosmicznego Teleskopu Hubble'a odkryli dowody, że w galaktyce M87 istnieje duża czarna dziura. Autorzy programu zaprosili mnie oraz Kipa Thorne'a, żebyśmy wyjaśnili widzom znaczenie tego odkrycia. Przygotowałem mały pokaz. Jeżeli dwuwymiarową powierzchnią dokonasz cięcia przez środek czarnej dziury, to spodziewasz się, że będzie to dwuwymiarowa płaska powierzchnia, taka jak boisko do koszykówki, z promieniem Schwarzschilda podobnym do koła wymalowanego na środku boiska. Osobliwość byłaby punktem w środku koła. Nic bardziej mylnego. W rzeczywistości to dwuwymiarowe cięcie przez czarną dziurę jest zakrzywione. Wygląda jak lejek albo czara głosowa trąbki skierowanej do góry (il. 20.1). Trzeci wymiar nie jest realny — jest tutaj tylko po to, aby uwidocznić krzywiznę dwuwymiarowej powierzchni lejka. Nie zwracaj uwagi na przestrzeń nad i pod lejkiem — jedyne, co jest realne, to kształt samego lejka. W dużej odległości od osi powierzchnia lejka się wypłaszcza, więc zaczyna wyglądać jak płaskie boisko — daleko od czarnej dziury krzywizna jest słaba. Blisko osi lejek zakrzywia się coraz bardziej i coraz mocniej nachyla się w dół, aż staje się pionowy. W miejscu, gdzie lejek jest najwęższy, promień lejka wyznacza promień Schwarzschilda. Dlatego nazywamy ten obiekt czarną dziurą — to rzeczywiście jest dziura. W istocie, we współrzędnych, które wynalazł Karl Schwarzschild, współrzędna r jest nazywana promieniem obwodowym (ang. *circumferential radius*), ponieważ $2\pi r$ jest obwodem w tym punkcie. Ten obwód leży na powierzchni lejka. Możesz wyobrazić sobie lejek jako ciąg coraz mniejszych okręgów, którego granicą jest najmniejszy okrąg u dołu lejka (gdzie obwód jest równy 2π razy promień Schwarzschilda). Promień Schwarzschilda jest promieniem otworu u dołu lejka (zignoruj podstawkę w kształcie kołnierza na ilustracji 20.1 — ona jest tylko po, żeby lejek stał pionowo).

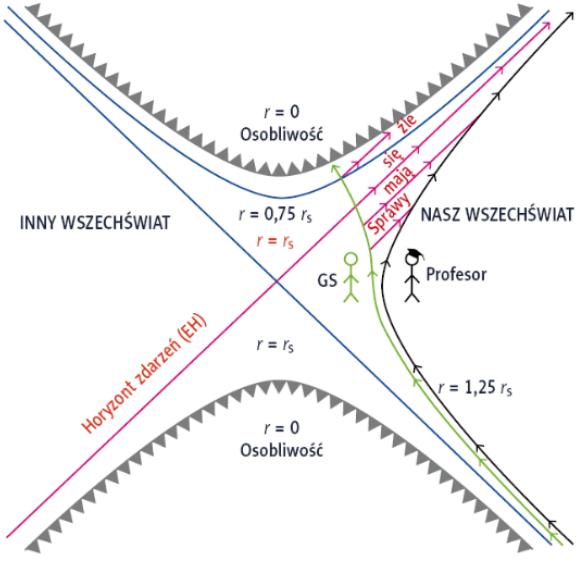


ILUSTRACJA 20.1. Lejek jako model czarnej dziury. Geometria czasoprzestrzeni wokół czarnej dziury nie jest płaska jak boisko do koszykówki, lecz zakrzywiona jak powierzchnia lejka. Boczna powierzchnia lejka staje się pionowa, gdy osiąga sferę Schwarzschilda, oznaczoną czerwoną taśmą. Obwód w tym miejscu jest równy 2π razy promień Schwarzschilda. Gdy wpadający do lejka astronauta osiągnie promień Schwarzschilda (okrąg oznaczony czerwoną taśmą), minie granicę, za którą nie ma powrotu. Zignoruj podstawkę w kształcie kołnierza, która utrzymuje lejek pionowo. Zignoruj także przestrzeń nad i pod lejkiem — realny jest tylko kształt samego lejka

Photo credit: J. Richard Gott

W trakcie mojego telewizyjnego wystąpienia zademonstrowałem widzom lejek w kształcie trąbki. Ustawiłem go szerokim otworem do góry, a wąskim końcem w dół (il. 20.1). Astronomowie zaobserwowali gaz krążący z dużą prędkością wokół czarnej dziury w M87. Zilustrowałem to, wrzucając kulki wzdłuż bocznej ściany lejka i pozwalając im poruszać się po spirali wewnątrz lejka, coraz niżej, aż w końcu znikały w dziurze u dołu. Podobnie zachowuje się gaz krążący wokół czarnej dziury. Warstwy gazu znajdujące się bliżej czarnej dziury krążą szybciej (chmura gazu nie wiruje jak ciało sztywne), a różnica prędkości powoduje tarcie. Na skutek tarcia gaz się rozgrzewa i świeci. Promieniowanie tego gazu widzimy, ponieważ jest ono emitowane poza horyzontem zdarzeń. Emitujący promieniowanie gaz traci energię i krążąc spiralnym ruchem, wpada do czarnej dziury. To jest źródło mocy kwazarów: gaz krążący po spirali wokół supermasywnej czarnej dziury. Widzimy ten gaz, dopóki krąży ponad horyzontem zdarzeń, ale przestajemy go widzieć, gdy minie ten horyzont. Przygotowany przeze mnie pokaz obejmował wszystkie te kwestie. Wydawało mi się, że jest pouczający i byłem przygotowany do nagrywania programu, ale pokazałem ją mojej siedmioletniej córce, która zasugerowała, żeby dodać jeszcze astronautę. Poszła do swojego pokoju i przyniosła nieznaną mi zabawkę — małą, dwucentymetrową figurkę

astronauty z programu „Apollo”, ubranego w skafander i trzymającego maleńką amerykańską flagę. Jeżeli jesteś na orbicie wokół czarnej dziury, będziesz długo krążył po spirali jak moje kulki, zanim wpadniesz do środka, ale możesz także polecieć prosto w dół jak doktorant. Położyłem figurkę astronauty na górnej krawędzi lejka i po prostu pozwoliłem jej się ześlizgnąć w dół… i zniknąć w czarnej dziurze u dołu. Doskonale. Czarna dziura to hotel, w którym możesz się zameldować, ale nie możesz się z niego wymeldować. Trajektoria astronauty wpadającego prosto w dół — jego linia geodezyjna — jest zakrzywiona, gdyż spada on wzdłuż zakrzywionej powierzchni lejka. Gdy upuszczam figurkę astronauty, spada wzdłuż tej linii w moim modelu, więc miałem dobrą ilustrację zakrzywienia czasoprzestrzeni. Gdy ekipa telewizyjna zabiera się do pracy i filmuje audycję, zazwyczaj trwa to wiele godzin. Nagrali mnóstwo ujęć moich starannie przygotowanych demonstracji z kulkami krążącymi po spirali wokół lejka, a następnie zmontowali z tego wszystkiego krótki klip, który ukazał się w programie telewizyjnym. I jak myślisz, co pokazali w tym filmie? Oczywiście tylko tego małego astronautę wpadającego prosto do lejka! Teraz wiesz, jak wygląda geometria otoczenia czarnej dziury — jak lejek z otworem u dołu.



ILUSTRACJA 20.2. Diagram Kruskala. Diagram czasoprzestrzenny pokazujący geometrię na zewnątrz i wewnątrz (nierotującej) czarnej dziury Schwarzschilda. Przyszłość jest u góry. Diagram reprezentuje zakrzywioną, pustą przestrzeń wokół punktowej masy, która istniała od zawsze. Nasz wszechświat jest po prawej. Pokazane są linie świata profesora i doktoranta (GS — Graduate Student). Profesor znajduje się na zewnątrz, w bezpiecznej odległości 1,25 promienia Schwarzschilda ($1{,}25r_s$). Doktorant wpada do czarnej dziury i trafia do osobliwości w $r = 0$. Horyzont zdarzeń (EH — Event Horizon) przebiega wzdłuż linii, dla której promień jest równy promieniowi Schwarzschilda ($r = r_s$)

Credit: J. Richard Gott

Kształt tego lejka opisuje rozwiązanie Schwarzschilda znalezione w 1916 roku przez Karla Schwarzschilda. Ale układ współrzędnych Schwarzschilda, mimo że był bardzo pomysłowy, załamał się na promieniu Schwarzschilda. Jego rozwiązanie opisywało geometrię powyżej promienia Schwarzschilda, ale nie opisywało wnętrza. To przypomina sytuację, w której dysponujesz mapą półkuli północnej, ale nie masz nic na temat półkuli południowej. Początkowo sądzono, że to wszystko, co jest możliwe, ale pod koniec lat sześćdziesiątych mój kolega, Martin Kruskal z wydziału matematyki stosowanej Uniwersytetu Princeton, oraz George Szekeres z Uniwersytetu Nowej Południowej Walii, niezależnie od siebie znaleźli sposób rozszerzenia układu współrzędnych, tak aby rozwiązanie obejmowało całe wnętrze czarnej dziury. Przeanalizujemy teraz diagram czasoprzestrzenny tego rozwiązania, zwany diagramem Kruskala (il. 20.2).

Na tym dwuwymiarowym diagramie jeden wymiar przestrzenny jest reprezentowany na osi poziomej, a czas jest reprezentowany na osi pionowej — przyszłość jest u góry diagramu. Wiązki światła na diagramie poruszają się wzdłuż linii prostych, nachylonych pod kątem 45°. Prędkość światła jest stała, co odzwierciedla stałe nachylenie równe 45°. Zilustrujemy diagram, analizując losy profesora i jego doktoranta. Zaczniemy od linii świata profesora, która jest reprezentowana przez czarną linię ze strzałkami. Linia nie jest prosta, ponieważ profesor przyspiesza. Silniki jego rakiety pracują, utrzymując statek w odległości 1,25 promienia Schwarzschilda od czarnej dziury. Profesor pozostaje poza czarną dziurą. W połowie diagramu linia świata jest pionowa, a następnie wygina się na prawo. W płaskiej czasoprzestrzeni byłaby to linia świata cząstki spoczywającej w środku, a następnie przyspieszającej (zwiększającej swoją prędkość) w prawo. Pełna linia świata profesora jest hiperbolą. Zakrzywia się, więc w odległej przyszłości idzie w górę pod kątem 45°, przybliżając się do prędkości światła. Zgodnie z zasadą równoważności przyspieszający obserwator w płaskiej czasoprzestrzeni jest równoważny stacjonarnemu obserwatorowi (profesorowi) w polu grawitacyjnym. Na diagramie Kruskala linia świata profesora jest zakrzywiona jak hiperbola.

Wyobraźmy sobie poziomą linię odchodzącą w prawo od środka, gdzie przecinają się dwie linie nachylone pod kątem 45° i tworzące literę X (na ilustracji ta pozioma linia nie jest zaznaczona, by nie psuć jego przejrzystości). Reprezentuje ona w czasoprzestrzeni fikcyjny promień rozciągający się od dziury u dołu lejka wprost na zewnątrz lejka i biegnący w ustalonym momencie czasu (drugi wymiar lejka, promień obwodowy, jest pominięty na diagramie).

Linia świata doktoranta GS jest oznaczona kolorem zielonym. Początkowo, w dolnej części diagramu, doktorant podróżuje wraz z profesorem. Ich linie świata są równoległe do momentu/miejsca, w którym doktorant oddala się od profesora, pozostawiając go w środkowym punkcie linii świata profesora. Doktorant swobodnie opada; jego linia świata przechodzi przez horyzont czarnej dziury, natomiast profesor przyspiesza w prawo. Horyzont zdarzeń (oznaczony EH oraz $r = r_s$, czyli w miejscu, gdzie promień jest równy promieniowi Schwarzschilda) jest (kolor różowy) linią prostą, nachyloną pod

kątem 45°, do której asymptotycznie zbliża się linia świata profesora w odległej przyszłości, ale nigdy się z nią nie zetknie. Jest nachylona pod kątem 45°, ponieważ wiązka światła (w tym przypadku fala radiowa) niosąca sygnał „SIĘ” porusza się wzdłuż niej. Tak jest na tym diagramie. W rzeczywistej czasoprzestrzeni horyzont zdarzeń jest trójwymiarową powierzchnią (bo czasoprzestrzeń jest czterowymiarowa), utkaną z linii świata, czyli trajektorii, sygnałów świetlnych (fotonów), które chcą radialnie wyjść na zewnątrz, lecz schwytane przez grawitację mają wciąż tę samą współrzędną radialną. W momencie, gdy linia świata doktoranta przekracza diagonalną linię horyzontu zdarzeń, wysyła on sygnał „SIĘ”. Ten sygnał nigdy nie dotrze do profesora. Wiązki światła (promieniowania radiowego) niosące sygnały „SPRAWY” oraz „MAJĄ” reprezentują dwie różowe linie nachylone pod kątem 45°. Te wiązki zostały wyemitowane, zanim doktorant przekroczył horyzont zdarzeń, więc ich linie świata przetną się z linią świata profesora i profesor odczyta te sygnały. Na ilustracji widać, że sygnał „MAJĄ” dotrze do profesora dopiero w odległej przyszłości.

Gdzie są punkty leżące w odległości 0,75 promienia Schwarzschilda? Tworzą przekręconą (kolor fioletowy) hiperbolę, która wygląda jak uśmiech wiszący nad diagonalną linią horyzontu zdarzeń. U góry po prawej ta hiperbola zbliża się do diagonalnej linii horyzontu zdarzeń (EH), ale nigdy się z nią nie zetknie. Osobliwość w $r = 0$ jest także reprezentowana przez (kolor czarny, linia ząbkowana) uśmiech w kształcie hiperboli położony nad uśmiechem reprezentującym $r = 0{,}75$ promienia Schwarzschilda. Linia świata doktoranta przecina ten uśmiech. Umieściliśmy zęby na tym szerokim uśmiechu, ponieważ są to szczęki, które wciągną i zmiażdżą doktoranta. Na ilustracji widać, że osobliwość $r = 0$ nie jest punktem w przestrzeni, który jest nieruchomy w przestrzeni względem obserwatora zewnętrznego nieruchomego. Gdyby osobliwość była takim punktem w przestrzeni, to w czasoprzestrzeni byłaby reprezentowana przez pionową linię świata. W rzeczywistości osobliwość jest trójwymiarową powierzchnią (podobnie jak horyzont zdarzeń), będącą osobliwym brzegiem czasoprzestrzeni (w geometrii brzeg figury ma wymiar o jeden mniejszy od wymiaru figury: brzegiem trójwymiarowej kuli jest dwuwymiarowa sfera, brzegiem dwuwymiarowego prostokąta jest jednowymiarowa łamana linia, a brzegiem odcinka są dwa punkty, którym przypisuje się wymiar zero). Można obrazowo powiedzieć, że czasoprzestrzeń czarnej dziury jest tak zakrzywiona, że osobliwość tworzy odwróconą hiperbolę leżącą w przyszłości, a nie, jak można by się spodziewać, pionową linię po lewej stronie. W istocie, gdy doktorant przekroczy linię horyzontu zdarzeń, przecięcie tej hiperboli staje się nieuchronne. Doktorant nie może tego uniknąć, podobnie jak ty nie możesz uniknąć następnego wtorku. Niezależnie od mocy swoich silników, nie może się poruszać z prędkością większą od prędkości światła, więc jego linia świata musi iść w górę pod kątem większym od 45°. Gdy przekroczy linię horyzontu zdarzeń, hiperbola reprezentująca osobliwość wisi nad nim, rozpięta na dwóch liniach tworzących kąty ±45°, więc jego linia świata musi przeciąć tę hiperbolę. Jest zgubiony. Wiązka światła niosąca sygnał „ŹLE”, którą doktorant

wysłał pod kątem od 45° w prawo, gdy przekroczył horyzont zdarzeń, także wpadnie w szczęki osobliwości w $r = 0$.

Możemy uzupełnić diagram Kruskala, aby uzyskać kompletne rozwiązanie dla masy rozłożonej na osobliwym brzegu (powierzchni) czasoprzestrzeni, która zaczęła się w nieskończonej przeszłości i będzie istnieć do nieskończonej przyszłości w pustym wszechświecie. Diagonalną linię horyzontu zdarzeń EH przecina pod kątem druga diagonalna linia, tworząc gigantyczny znak X w centrum diagramu. Znak X dzieli czasoprzestrzeń na cztery obszary. Zewnętrze czarnej dziury, w którym żyje profesor, leży na prawo od znaku X. To nasz wszechświat. Powyżej znaku X jest wnętrze czarnej dziury. U góry, w przyszłości, wisi osobliwość. Poniżej znaku X leży początkowa osobliwość, oznaczona $r = 0$, w przeszłości. Po lewej jest inny wszechświat, podobny do naszego. Jest połączony z naszym wszechświatem w jednym punkcie — łącznikiem jest tunel czasoprzestrzenny w centrum. Jeżeli dokonamy poziomego cięcia przez środek naszego diagramu czasoprzestrzennego, będziemy mieli przecięcie w określonym momencie czasu. Jego geometria będzie przypominać dwa lejki złączone w najwęższym miejscu. Daleko po prawej stronie lejek ma duży obwód, reprezentujący duży promień, daleko od czarnej dziury. Gdy przesuwamy się w lewo, lejek robi się coraz węższy, aż dochodzimy do obwodu równego $2\pi r_{\text{Schwarzschild}}$, któremu odpowiada horyzont zdarzeń w środku znaku X. Od tego miejsca lejek rozszerza się ponownie do dużego promienia, na którym rozpięty jest inny wszechświat — po lewej stronie znaku X. Dwa lejki są złączone, tworząc tunel czasoprzestrzenny. Daleko od tunelu lejki się wypłaszczają, zaczynają wyglądać jak boiska do koszykówki i rozciągają się do nieskończoności. Wyobraź sobie drugie boisko do koszykówki, położone na piętrze budynku, z zakrzywionym lejkiem skierowanym w dół (jak dziura na polu golfowym) i łączącym się z dziurą w suficie boiska na parterze, gdzie lejek ponownie się wypłaszcza na boki, tworząc całkiem płaski sufit. Boisko na piętrze reprezentuje nasz wszechświat, a sufit parteru reprezentuje inny wszechświat, połączony z naszym małą dziurą łączącą gładko boisko na piętrze z sufitem parteru. Te dwa wszechświaty są połączone tunelem czasoprzestrzennym w punkcie czasoprzestrzeni reprezentowanym przez poziomą linię przecinającą diagram. Niestety, nie możemy użyć tego tunelu, aby przenieść się z jednego wszechświata do drugiego, ponieważ ramiona znaku X są nachylone dokładnie pod kątem 45°. Aby przenieść się z obszaru na prawo od znaku X (z naszego wszechświata) do obszaru na lewo od znaku X (do innego wszechświata), musiałbyś mieć linię świata nachyloną pod kątem większym od 45° względem pionu. Musiałbyś się poruszać z prędkością większą od prędkości światła, a to nie jest możliwe. Ale w zasadzie mógłbyś spotkać mieszkańca tego innego wszechświata wewnątrz czarnej dziury w górnym kwadrancie (w przyszłości). Moglibyście nawet się przywitać, uścisnąć dłonie i zamienić kilka słów — na przykład „Sprawy mają się źle” — zanim obaj zginiecie w szczękach tej uśmiechniętej osobliwości w kwadrancie przyszłości. Dotrzecie do niej w skończonym czasie.

Osobliwość w przeszłości, w dolnej części diagramu, jest podobna do osobliwości Wielkiego Wybuchu na początku naszego wszechświata. Ta część rozwiązania jest nazywana białą dziurą. Jest to wersja czarnej dziury odwrócona w czasie — jak film o czarnej dziurze puszczony od tyłu. Cząstka może zostać stworzona w osobliwości białej dziury u dołu diagramu, a jej linia świata może trafić do naszego wszechświata. Skoro cząstki mogą wpadać do czarnej dziury, to mogą także wyłaniać się z białej dziury.

Czarne dziury, które możemy napotkać w naszym Wszechświecie, nie istniały od zawsze. W realistycznych przypadkach czarne dziury mogą powstawać w wyniku kolapsu gwiazd. Wyobraź sobie, że w czasoprzestrzennym diagramie Kruskala powierzchnia zapadającej się gwiazdy leży tuż poniżej stóp doktoranta: tuż poniżej stóp doktoranta, gdy jest ze swoim profesorem; i tuż poniżej stóp doktoranta, który spada swobodnie. To mogłoby reprezentować sytuację, gdy powierzchnia gwiazdy przez długi czas utrzymuje promień 1,25 promienia Schwarzschilda, po czym nagle zapada się swobodnie tuż poniżej stóp doktoranta, który spada swobodnie. Linia świata powierzchni gwiazdy jest równoległa i nieco na lewo od linii świata doktoranta. Poniżej spadającego doktoranta jest wnętrze gwiazdy, poniżej jej powierzchni, gdzie gęstość materii jest większa od zera, więc próżniowe rozwiązanie Kruskala nie ma zastosowania. Zatem musimy zignorować część diagramu na lewo od linii świata doktoranta — nie ma tunelu czasoprzestrzennego, nie ma innego wszechświata, nie ma białej dziury u dołu — one nie powstają, gdy czarna dziura powstaje, gdy zapada się gwiazda. Ale fragment diagramu na prawo od linii świata doktoranta jest w próżni, więc poprawnie opisuje to, co się dzieje. Doktorant zostaje zmiażdżony, gdy jego linia świata natrafia na osobliwość w $r = 0$. Gdybyś mieszkał wewnątrz gwiazdy (w małym pomieszczeniu z klimatyzacją), zostałbyś zmiażdżony, gdy objętość gwiazdy skurczy się do zera, a jej gęstość wzrośnie do nieskończoności. Na twoją linię świata także czeka zakrzywiona osobliwość w przyszłości: trafisz do $r = 0$, gdy rozmiary twojej gwiazdy skurczą się do zera.

Dobra rada: nie przekraczaj promienia Schwarzschilda, a wszystko będzie dobrze. Możesz bez kłopotów krążyć wokół czarnej dziury, ale poza jej horyzontem zdarzeń. Gdyby Słońce się zapadło i utworzyło czarną dziurę, Ziemia pozostałaby na swojej obecnej orbicie poza horyzontem zdarzeń. Mógłbyś obserwować czarną dziurę, która wyglądałaby jak czarny dysk na tle nieba otoczony przez grawitacyjnie zogniskowane obrazy gwiazd znajdujących się za nim (il. 20.3).



ILUSTRACJA 20.3. Symulacja obrazu czarnej dziury Schwarzschilda. Wygląda jak czarny dysk na tle nieba otoczony przez grawitacyjnie zogniskowane obrazy odległych gwiazd. Widoczne są dwa obrazy płaszczyzny galaktyki, której światło jest ugięte po obu stronach czarnej dziury, zanim trafi do twoich oczu

Photo credit: Andrew Hamilton (obraz Drogi Mlecznej Axela Mellingera został użyty jako tło)

W 1963 roku Roy Kerr odkrył dokładne rozwiązanie polowych równań Einsteina dla wirującej czarnej dziury (czyli czarnej dziury z niezerowym momentem pędu). Geometria tego rozwiązania wewnątrz horyzontu zdarzeń jest bardziej skomplikowana (omówimy ją w rozdziale 21), ale horyzont zdarzeń oznacza granicę, za którą nie ma powrotu, podobnie jak w przypadku czarnej dziury Schwarzschilda. Rozwiązanie Kerra zostało triumfalnie potwierdzone 14 września 2015 roku, gdy interferometr LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) zarejestrował powstanie wirującej czarnej dziury Kerra o masie 62 mas Słońca, która powstała w wyniku zderzenia czarnej dziury o masie 29 mas Słońca z czarną dziurą o masie 36 mas Słońca. Tworzyły one ciasny układ podwójny, w którym obie czarne dziury krążyły wokół siebie wzdłuż zacieśniającej się spirali, stopniowo tracąc energię na skutek emisji fal grawitacyjnych. Badając widmo fal grawitacyjnych (zmarszczek w geometrii czasoprzestrzeni), wyemitowanych w momencie zderzenia, astronomowie mogli obliczyć masę obu czarnych dziur. Przed zderzeniem obie czarne dziury krążyły wokół siebie, co oznacza, że ich układ podwójny miał niezerowy moment pędu, więc nie ma nic dziwnego w tym, że w wyniku zderzenia powstała wirująca czarna dziura. LIGO zarejestrował jej stopniowo gasnące wibracje powstałe w wyniku zderzenia, które dokładnie pasują do wibracji, jakie przewiduje rozwiązanie Kerra. Astronomowie zdołali nawet zmierzyć, że czarna dziura miała około 67% maksymalnego momentu pędu, jakie teoria dopuszcza dla czarnej dziury o takiej masie. Całe zderzenie, łącznie z emisją fal grawitacyjnych, zostało wysymulowane na superkomputerze, który rozwiązał równania Einsteina i wyliczył geometrię czasoprzestrzeni. Zgodność między wynikami

komputerowej symulacji i zarejestrowanym widmem fal grawitacyjnych wskazuje, że równania Einsteina działają także w przypadku silnie zakrzywionej czasoprzestrzeni — jest to bardzo ważny wynik.

W 1974 roku Stephen Hawking dokonał zaskakującego odkrycia: czarna dziura emituje promieniowanie termiczne. Energia jednak może uciec z czarnej dziury. Jak doszło do tego odkrycia? Jakob Bekenstein, doktorant Uniwersytetu Princeton, rozmawiał ze swoim promotorem, Johnem Archibaldem Wheelerem. To właśnie Wheeler był autorem określenia „czarna dziura". To bardzo dobra nazwa! Czarne dziury są dziurami i są czarne — nie emitują światła. Jak powiedział Neil, astronomowie wolą proste nazwy — „jest czarna i jest dziurą, więc dlaczego by nie nazwać jej »czarną dziurą«?". Wheeler był ojcem chrzestnym badań nad czarnymi dziurami i w latach sześćdziesiątych pomógł wskrzesić zainteresowanie ogólną teorią względności. Wraz z Charlesem W. Misnerem i Kipem Thorne'em napisał autorytatywny podręcznik *Gravitation*, którego szczotki drukarskie studiowałem jako doktorant. Gdy Kruskal odkrył swój diagram, wysłał go Wheelerowi z prośbą o opinię i wyjechał na wakacje. Wheeler przeczytał tekst i uznał, iż jest tak ważny, że sam napisał artykuł i wysłał go do czasopisma „Physical Review" z Kruskalem jako jedynym autorem! Gdy Kruskal wrócił z wakacji, dowiedział się, że jego artykuł jest już wysłany do redakcji czasopisma.

Wheeler zaprosił swojego doktoranta, Bekensteina, na rozmowę. Przyniósł filiżankę gorącej herbaty, wlał do niej trochę zimnej wody, i powiedział: „Właśnie popełniłem przestępstwo: zwiększyłem entropię (nieporządek) we Wszechświecie, i nie mogę zmniejszyć, ponieważ nie mogę odmieszać herbaty i wody". Bekenstein wiedział, że entropia Wszechświata zawsze rośnie z czasem. Jeżeli rozbijesz filiżankę, nieporządek we Wszechświecie wzrasta, ponieważ nieczęsto widzimy, jak odłamki filiżanki podrywają się z podłogi, dopasowują i składają się z powrotem w filiżankę. W istocie, gdy widzisz film, na którym dzieje się coś takiego, śmiejesz się, ponieważ wiesz, że to się nie zdarza. Jest pewne prawdopodobieństwo, że coś takiego się zdarzy, ale jest ono bardzo małe. Statystycznie spodziewamy się, że nieporządek we Wszechświecie wzrasta z czasem — ta zasada nosi nazwę drugiego prawa termodynamiki. Ludzie lubią porządek. To wstyd, żeby rozbijać piękne filiżanki. Kierując się tą logiką, każdy wzrost entropii, na przykład zmieszanie herbaty i wody, może być uważane za przestępstwo. Wheeler kontynuował: „Ale teraz ukryję dowody mojego przestępstwa, wlewając letnią mieszaninę gorącej herbaty i zimnej wody do czarnej dziury. Masa czarnej dziury wzrośnie: jej masa będzie taka sama jak poprzednio, plus masa herbaty i wody, ale ani trochę więcej, niż byłaby, gdybym wlał do czarnej dziury oddzielnie herbatę i wodę. Odtworzyłem rezultat, który miałbym, gdybym uprzednio nie zmieszał herbaty i wody. Wydaje się, że to jest sprzeczne z drugim prawem termodynamiki. Pomyśl o tym!".

Bekenstein potraktował poważnie ideę Wheelera. Znakomity artykuł, który był rezultatem jego przemyśleń, wywarł na mnie ogromne wrażenie. Bekenstein zwrócił uwagę, że Hawking udowodnił twierdzenie, zgodnie z

którym całkowita powierzchnia wszystkich horyzontów zdarzeń we Wszechświecie zawsze rośnie z czasem, jeżeli gęstość masy jest wszędzie nieujemna, co wydaje się rozsądne. Gdy do czarnej dziury coś wpada, jej masa rośnie, a jej promień Schwarzschilda się zwiększa. Pole powierzchni horyzontu zdarzeń[20], które wynosi $4\pi r^2_{\text{Schwarzschild}}$, również wzrasta. Gdy dwie czarne dziury się zderzają, jak w przypadku zarejestrowanym przez LIGO, tworzą czarną dziurę, której pole powierzchni horyzontu zdarzeń jest większe niż suma pól powierzchni horyzontów zdarzeń, jakie miały przed zderzeniem. W przypadku LIGO obliczono, że pole powierzchni horyzontu zdarzeń końcowej, wirującej czarnej dziury Kerra, o masie 62 mas Słońca, jest co najmniej o czynnik 1,5 większe niż suma pól powierzchni horyzontów zdarzeń, jakie miały przed zderzeniem dwie początkowe czarne dziury o masie 29 i 36 mas Słońca. Bekenstein zwrócił uwagę, że zjawisko polegające na tym, że całkowita powierzchnia wszystkich horyzontów zdarzeń we Wszechświecie zawsze rośnie z czasem, przypomina entropię, która oczywiście także zawsze rośnie z czasem.

Bekenstein wykonał eksperyment myślowy: wpuścił cząstkę nieskończenie powoli (na sznurku, bardzo powoli, niemal odwracalnie) do czarnej dziury Schwarzschilda, a następnie obliczył, o ile wzrosło pole powierzchni jej horyzontu zdarzeń. Wzrost pola powierzchni był równoważny utracie jednego bitu informacji, mianowicie informacji, czy ta cząstka istniała czy nie. Wiedząc, że utrata informacji w tym eksperymencie myślowym jest równa określonemu wzrostowi entropii, znalazł związek między liczbą utraconych bitów i wzrostem powierzchni horyzontu zdarzeń czarnej dziury. Okazało się, że utrata jednego bitu informacji jest równoważna wzrostowi pola powierzchni rzędu $(1{,}6 \times 10^{-33}\ \text{cm})^2 = hG/2\pi c^3$ (wszystkie te stałe to nasi starzy przyjaciele — stała Plancka h, stała grawitacji Newtona G, prędkość światła c). Tę odległość, $1{,}6 \times 10^{-33}$ cm, spotkamy jeszcze w rozdziale 24 — jest to skala, przy której geometria czasoprzestrzeni staje się nieokreślona ze względu na kwantową zasadę nieoznaczoności Heisenberga. Gdy Wheeler wlał swoją mieszaninę herbaty i wody do czarnej dziury, zwiększył pole powierzchni jej horyzontu oraz jej entropię. Entropia całego Wszechświata także wzrosła odpowiednio, ponieważ czarna dziura ma entropię, która wzrosła, gdy wlała się do niej mieszanina herbaty i wody. Bekenstein doszedł do wniosku, że czarne dziury mają dużą, ale skończoną entropię.

Co ciekawe, praca Bekensteina określa graniczną ilość informacji, jaką może przechowywać twój 6-calowy dysk twardy: 10^{68} bitów = $1{,}16 \times 10^{58}$ gigabajtów. Jeżeli będziesz próbował upakować w nim więcej informacji, to jego masa przekroczy punkt krytyczny, dysk zapadnie się i powstanie czarna dziura (szczegóły tego rozumowania zawiera dodatek 2). Praca Bekensteina określa także graniczną ilość informacji, jaka może się zmieścić w kuli o promieniu widzialnego Wszechświata, co oznacza, że maksymalna liczba obserwowalnych wszechświatów, o podobnych rozmiarach i energii jak nasz Wszechświat, wynosi 10^(10^124). Tę liczbę Neil wspomniał w rozdziale 1. Jak widać, artykuł Bekensteina ma wiele zastosowań.

Ale Hawking — w odróżnieniu ode mnie — sądził, że artykuł Bekensteina jest błędny. Jeżeli zwiększysz energię czarnej dziury o pewną skończoną wartość, to zwiększysz jej entropię, a to z kolei oznacza — dzięki prostemu rozumowaniu opartemu na zasadach termodynamiki — że czarna dziura ma określoną temperaturę. Hawking uważał, że to błąd. Obiekty, które mają niezerową temperaturę, muszą świecić, a czarne dziury nie świecą. Czarne dziury są czarne — ich temperatura jest równa zeru.

Roger Penrose udowodnił, że w szczególnym przypadku wirującej czarnej dziury, jeżeli jakaś niestabilna cząstka rozpadnie się na dwie cząstki w pobliżu horyzontu zdarzeń i jedna z nich wpadnie pod horyzont zdarzeń z prędkością przeciwnie skierowaną względem kierunku wirowania czarnej dziury, to druga cząstka ucieknie z energią większą od całkowitej energii, jaką miała pierwotna, niestabilna cząstka. W przypadku wirującej czarnej dziury część jej masy jest związana w postaci energii rotacji. Jeżeli do czarnej dziury wpadnie cząstka z prędkością przeciwnie skierowaną względem kierunku wirowania czarnej dziury, to prędkość rotacji się zmniejszy, więc całkowita masa także się zmniejszy. Ucieczka drugiej cząstki z dużą energią odbywa się na koszt energii rotacji czarnej dziury. W tym procesie pole powierzchni horyzontu zdarzeń czarnej dziury nieznacznie się zwiększy. Demetrios Christodoulou, jeden ze studentów Wheelera, badał te zagadnienia i obliczył graniczną ilość energii, jaką można uzyskać z wirującej czarnej dziury. W Związku Radzieckim Jakow Borisowicz Zeldowicz przeprowadził podobne rozumowanie dla fal elektromagnetycznych i podał heurystyczny dowód, że w procesie rozproszenia fali elektromagnetycznej na wirującej czarnej dziurze może się pojawić efekt wzmocnienia fali, podobnie jak w odkrytym przez Einsteina zjawisku wymuszonej emisji promieniowania, która stanowi podstawę działania lasera. Kierując się taką logiką, można przypuszczać, że w przypadku wirującej czarnej dziury powinno zachodzić także zjawisko spontanicznej emisji promieniowania elektromagnetycznego na koszt zmniejszającej się energii rotacji. Aleksiej Aleksandrowicz Starobinsky obliczył ten efekt dla fal emitowanych przez wirującą czarną dziurę Kerra.

Don Page, student Hawkinga, opowiadał[21], że Hawking chciał znaleźć solidne podstawy do tych wszystkich idei. Hawking badał procesy kreacji i anihilacji cząstek w zakrzywionej czasoprzestrzeni Schwarzschilda — zagadnienie z pogranicza mechaniki kwantowej i teorii grawitacji — aby sprawdzić, czy stacjonarna (niewirująca) czarna dziura może rzeczywiście emitować jakiekolwiek promieniowanie. Ku swemu zaskoczeniu odkrył, że w wyniku spontanicznej kreacji cząstek w jej sąsiedztwie czarna dziura emituje promieniowanie termiczne. Czarna dziura jednak ma skończoną, niezerową temperaturę! Hawking wykorzystał fakt, że w próżni nieustannie zachodzą procesy kreacji i anihilacji cząstek. Są to tak zwane cząstki wirtualne, które pojawiają się parami i natychmiast znikają. Kwantowa zasada nieoznaczoności Heisenberga mówi, że w bardzo krótkim czasie energia takiej pary wirtualnych cząstek jest w znacznym stopniu nieokreślona. Energia niezbędna do powstania pary elektron–pozyton (zawsze powstają cząstki o przeciwnych znakach, ponieważ całkowity ładunek musi być zachowany) może być

„pożyczona” od próżni na bardzo krótki czas. Para elektron–pozyton może powstać w próżni i po krótkim czasie (rzędu 3×10^{-22} sekundy) anihiluje. W pobliżu czarnej dziury może się zdarzyć, że elektron może powstać tuż pod powierzchnią horyzontu zdarzeń, a pozyton tuż nad powierzchnią horyzontu zdarzeń. Elektron, który znalazł się wewnątrz powierzchni horyzontu zdarzeń, nie może uciec, więc do anihilacji nie dojdzie. Elektron wpada do czarnej dziury, a pozyton ucieka. Grawitacyjna energia potencjalna elektronu, który został wykreowany pod powierzchnią horyzontu zdarzeń, jest ujemna i co do wartości bezwzględnej większa od masy spoczynkowej $E = mc^2$, więc jego całkowita energia jest ujemna. Wpadając do czarnej dziury, elektron zabiera jej trochę energii, a zatem także trochę masy, co kompensuje masę i energię pozostawionego na zewnątrz (wyemitowanego) pozytonu. Wokół czarnej dziury istnieje kwantowy stan próżni (obecnie zwany próżnią Hartle'a-Hawkinga) o ujemnej gęstości energii, który nie spełnia założenia o dodatniej gęstości energii, na którym oparte było twierdzenie Hawkinga o wzroście powierzchni. W tym przypadku powierzchnia horyzontu zdarzeń nieznacznie maleje, gdy pozyton ucieka. Może także się zdarzyć, że to elektron ucieka, a pozyton wpada. Podobny efekt może dotyczyć par fotonów: jeden foton powstaje tuż pod powierzchnią horyzontu zdarzeń i wpada do czarnej dziury, a drugi foton powstaje tuż nad powierzchnią horyzontu zdarzeń i ucieka. Hawking odkrył, że czarne dziury emitują promieniowanie termiczne (obecnie zwane promieniowaniem Hawkinga), które powoduje, że czarne dziury się kurczą i w końcu wyparowują. Charakterystyczna długość fali tego promieniowania (λ_{max}) jest w przybliżeniu równa 2,5 razy promień Schwarzschilda czarnej dziury, co oznacza, że czarna dziura o masie 10 mas Słońca emituje fale radiowe o długości 75 kilometrów — zbyt słabe, abyśmy mogli je zarejestrować. Temperatura tego promieniowania jest bardzo niska, 6×10^{-9} K (z bardzo niewielkim udziałem pozytonów i elektronów). Dlatego Stephen Hawking nie dostał Nagrody Nobla. Gdyby promieniowanie czarnych dziur było dostatecznie silne, abyśmy mogli je wykryć, z pewnością by ją otrzymał. Wydaje się, że nikt nie wątpi w istnienie promieniowania Hawkinga, ale jest ono niezwykle słabe. W istocie, czarne dziury o masie Słońca lub większej absorbują więcej promieniowania (kosmicznego promieniowania tła), niż same emitują. Dopiero wtedy, gdy w bardzo odległej przyszłości kosmiczne promieniowanie tła się ochłodzi i ulegnie przesunięciu ku czerwieni, proces parowania czarnych dziur zacznie odgrywać istotną rolę.

Sporo czasu musi upłynąć, aby czarna dziura wyparowała w całości. Czarna dziura o masie 3×10^9 mas Słońca, taka jak w M87, emituje obecnie promieniowanie termiczne o temperaturze 2×10^{-17} K — głównie w postaci fotonów i grawitonów. Według obliczeń Dona Page'a czarna dziura o masie 3×10^9 mas Słońca potrzebuje 3×10^{95} lat, aby całkowicie wyparować. Obecnie pochłania więcej promieniowania CMB niż emituje w postaci promieniowania termicznego. Utrata masy zacznie się dopiero, gdy temperatura CMB spadnie poniżej 2×10^{-17} K, czyli za około 700 miliardów lat. W wyniku parowania czarna dziura skurczy się ostatecznie do rozmiarów około 10^{-33} cm, po czym zniknie w fajerwerku promieni gamma o

ultrawysokiej energii. Wydaje się, że informacja utracona przy tworzeniu czarnej dziury ostatecznie wycieknie w postaci promieniowania Hawkinga emitowanego w procesie parowania, ale w nieuporządkowanej postaci.

Szczegóły procesu parowania oraz jego wpływu na wnętrze czarnej dziury stanowią nadal przedmiot ożywionych debat. Niektórzy fizycy sądzą, że antycząstki (lub cząstki) wykreowane tuż poniżej horyzontu zdarzeń, odseparowane od cząstek (lub antycząstek) Hawkinga wyemitowanych poza horyzont, mogą utworzyć *firewall*, ścianę gorących fotonów tuż poniżej horyzontu zdarzeń, która zabije każdego astronautę przekraczającego horyzont. Ten efekt może się stać istotny dopiero, gdy z czarnej dziury wyparuje ponad połowa jej masy, co nastąpi w odległej przyszłości. Szczegóły zależą od stanu kwantowego, który tworzy się wokół czarnej dziury.

James Hartle i Stephen Hawking znaleźli stan kwantowy, który nie wybucha na horyzoncie zdarzeń, i w którym spadający astronauta nie zostanie unicestwiony, gdy przekroczy granicę. Gdy w próżni pojawia się wirtualna para cząstka–antycząstka (na przykład elektron i pozyton), ich stany kwantowe są splątane. Cząstki mają przeciwne momenty pędu i przeciwne spiny. Jeżeli zmierzysz spin jednej z nich względem określonego kierunku, natychmiast wiesz, że spin drugiej względem tego samego kierunku jest przeciwny. Tak jest także wtedy, gdy cząstki oddalą się na dużą odległość. Ten efekt niepokoił Einsteina, który nazwał tę właściwość mechaniki kwantowej „upiornym działaniem na odległość". W niedawno opublikowanym artykule Juan Maldacena i Leonard Susskind, dwaj eksperci w tej dziedzinie, stwierdzili, że kwantowe splątanie cząstki wyemitowanej i jej partnera wewnątrz czarnej dziury może uchronić wpadającego do czarnej dziury astronautę przed spaleniem, tak jak sugerowali Hartle i Hawking. Maldacena i Susskind uważają, że cząstka i antycząstka są połączone przez maleńki tunel czasoprzestrzenny. W zwykłej przestrzeni są oddalone na dużą odległość, lecz przez tunel czasoprzestrzenny niemal się dotykają. Tunel czasoprzestrzenny jest jak dziura w stole jadalnym, przez którą mrówka może przejść z blatu pod spód stołu. Droga przez tunel jest krótka. Natomiast odległość wejść do tunelu, liczona wokół krawędzi stołu jest bardzo duża. Mrówka musiałaby przemaszerować długą drogę po powierzchni blatu od otworu do krawędzi stołu, przejść pod spód stołu i następnie pod powierzchnią stołu pokonać odcinek od krawędzi stołu do dolnego otworu. Ta mrówka stwierdziłaby, że droga od górnego do dolnego otworu tunelu czasoprzestrzennego jest bardzo długa, natomiast mrówka, która przemknie wprost przez tunel, uzna, że otwory są bardzo blisko. To mogłoby być rozwiązanie problemu Einsteina z upiornym działaniem na odległość. Cząstka i antycząstka są zawsze blisko siebie, jeżeli ich odległość jest mierzona przez tunel czasoprzestrzenny. Co ciekawe, Wheeler zwrócił uwagę, że linie pola elektrycznego zbiegające się w otworze tunelu czasoprzestrzennego pod blatem stołu mogą wyglądać jak elektron, natomiast gdy wyłaniają się z otworu nad blatem, wyglądają jak pozyton. Wynikałby stąd wniosek, że cząstki i antycząstki mogłyby być połączone przez tunel czasoprzestrzenny taki jak w czarnej dziurze na diagramie Kruskala, gdzie tunel (zwany mostem Einsteina-Rosena) łączył dwa

wszechświaty. Współautorami artykułu Einsteina na temat upiornego działania na odległość byli Boris Podolsky i Nathan Rosen. Maldacena i Susskind sugerują, że paradoks Einsteina, Podolsky'ego i Rosena (zwany powszechnie paradoksem EPR) może być rozwiązany przez mikroskopowy most Einsteina-Rosena! Co jeszcze bardziej ciekawe, ani Einstein, ani Rosen, ani nikt inny wówczas nie zwrócił na to uwagi! Jeżeli to rozwiązanie jest poprawne, to doktoranci mogą bezpiecznie przekraczać horyzonty zdarzeń, jak sugerował Hawking. Ten przykład ilustruje pewne głębokie powiązania, które zostały odkryte dzięki pracom Hawkinga.

Dobrze pamiętam, nasze podniecenie, gdy Hawking odwiedził Caltech, aby nam opowiedzieć o swoim odkryciu, że czarne dziury parują. Zebraniu przewodniczył Kip Thorne, światowy ekspert od czarnych dziur. Wśród słuchaczy był Murray Gell-Mann, laureat nagrody Nobla. Thorne, przedstawiając Hawkinga, zapewniał nas o rewolucyjnej wadze tych badań. Całkowicie się z nim zgadzam — to jest najważniejszy rezultat w ogólnej teorii względności od czasów Einsteina. Badaniom czarnych dziur Stephen Hawking zawdzięcza swoją światową sławę. Niektóre z tych interesujących wydarzeń zostały odtworzone w filmie *Teoria wszystkiego*. Eddie Redmayne tak realistycznie i tak przekonująco zagrał głównego bohatera w tym wspaniałym filmie o Hawkingu, że rola ta przyniosła mu Oscara dla najlepszego aktora.

---

1 Scholastic Aptitude Test lub Scholastic Assessment Test — standardowy test dla absolwentów szkół średnich w USA.

2 Marmurowy pomnik umysłu, zawsze samotnie podróżującego przez dziwne morza myśli. https://pl.wikiquote.org/wiki/William_Wordsworth.

3 Według kryteriów sformułowanych przez filozofa, Karla Poppera, jest istotne, aby hipotezy naukowe były falsyfikowalne.

4 Obserwuję świetlny zegar astronautki, jak na ilustracji 17.1. W ogólnym przypadku astronautka mija mnie z prędkością v. Obserwuję świetlny zegar astronautki, gdy mija mnie od lewej do prawej strony. Gdy światło przemieszcza się o 1 stopę wzdłuż diagonalnej linii, rakieta przemieszcza się poziomo na odległość równą 1 stopa × v/c, od prawej do lewej. W tym czasie światło przemieszcza się w pionie na odległość równą 1 stopa × $\sqrt{[1 - (v^2/c^2)]}$. Trójkąt prostokątny o przeciwprostokątnej równej 1, o poziomym boku równym v/c, oraz pionowym boku równym $\sqrt{[1 - (v^2/c^2)]}$, spełnia twierdzenie Pitagorasa. Liczba $\sqrt{[1 - (v^2/c^2)]}$ podniesiona do kwadratu daje $[1 - (v^2/c^2)]$, więc jeżeli dodamy do niej (v^2/c^2), dostaniemy 1, zadowalając Pitagorasa. W czasie gdy wiązka światła w moim zegarze przemieszcza się w górę o 1 stopę, widzę, że jej wiązka światła przemieszcza się w górę tylko na odległość równą 1 stopa × $\sqrt{[1 - (v^2/c^2)]}$. Gdy ja starzeję się o dziesięć lat, astronautka starzeje się o 10 lat $\sqrt{[1 - (v^2/c^2)]}$.

5 Autorzy popularnych książek na temat szczególnej teorii względności prezentując takie przykłady, używają określenia „widzi", nie troszcząc się o to, że uważny czytelnik zapyta o niemożliwą do zrealizowania możliwość natychmiastowego „widzenia na odległość", którą tu się zakłada. W rzeczywistości Eartha nie „widzi", lecz w dość nietrywialny sposób „mierzy".

6 Porównanie jest nieco mylące, ponieważ w przypadku podróży w przestrzeni można wrócić do punktu wyjścia. W pytaniu o podróż w czasie chodzi zatem o podróż w przyszłość lub w przeszłość i powrót do chwili początkowej.

7 1. J. Richard Gott, *Will We Travel Back (or Forward) in Time?* „Time", 10 April 2000, s. 68-70, (Czy będziemy podróżować wstecz lub w przód w czasie?).

8 Chodzi o podróż w czasie bez powrotu do chwili początkowej.

9 Einstein zdał sobie sprawę dopiero wtedy, gdy zwrócili mu na to uwagę Eugene Wigner i Leó Szilárd. Według popularnej, aczkolwiek zapewne apokryficznej anegdoty, Szilárd powiedział o

tym Einsteinowi w trakcie spaceru w Princeton. Einstein zatrzymał się na środku skrzyżowania i odpowiedział: „Daran habe ich gar nicht gedacht" (O tym naprawdę nie pomyślałem).

10 William Shakespeare, *Hamlet, królewicz duński*, tłum. Józef Paszkowski, Państwowy Instytut Wydawniczy, wyd. 11, Warszawa 1973.

11 W statku kosmicznym kule spoczywają w układzie inercjalnym. Podłoga uderza w kule, bo podłoga spoczywa w układzie nieinercjalnym (statku) przyspieszającym w stronę kul. Na Ziemi kule lewitują w układzie swobodnie spadającej windy, zatem ten układ należy uznać za układ inercjalny. Układ laboratorium przyspiesza w górę w stosunku do układu spadającej windy i stąd pojawia się w nim grawitacja, podobnie jak pojawia się siła bezwładności w układzie przyspieszającej rakiety.

12 To rozumowanie jest historycznie ważne, lecz niepoprawne i obecnie jest metaforycznym obrazem tezy, że ciała ciężkie (czyli masywne) swoją grawitacją zakrzywiają czasoprzestrzeń wokół siebie.

13 Autor pomylił doktorat z habilitacją. Doktorat Riemanna dotyczył funkcji zespolonych, natomiast trzy lata później, w 1854 roku, Riemann habilitował się i przedstawił kilka tematów, z których jeden miał być przedmiotem wykładu habilitacyjnego. Gauss wybrał będącą dopiero w zarysie teorię przestrzeni wielowymiarowych.

14 Tensor krzywizny Riemanna $R^{\alpha}{}_{\beta\gamma\delta}$ w czterech wymiarach ma 256 składowych. Każdy z czterech wskaźników (górnych lub dolnych) — α, β, γ, δ — może przyjąć dowolną wartość odpowiadającą jednej z czterech współrzędnych czasoprzestrzennych (t, x, y, z). Daje to $4 \times 4 \times 4 \times 4 = 256$ składowych.

15 Tensor energii-pędu $T\mu\nu$ określa „zawartość" czasoprzestrzeni w określonym położeniu: gęstość masy, gęstość energii, ciśnienie, naprężenie, strumień energii, strumień pędu. Metryka $g_{\mu\nu}$ (którą już spotkaliśmy wcześniej — w płaskiej czasoprzestrzeni jest dana jako $\Delta s^2 = -\Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$) określa sposób pomiaru odległości w czasoprzestrzeni. $R_{\mu\nu}$ oraz R wylicza się ze składowych tensora krzywizny Riemanna. Tensory w równaniach Einsteina mają dwa wskaźniki, które mogą przyjmować wartości odpowiadające jednej z czterech współrzędnych, więc reprezentują $4 \times 4 = 16$ równań. Wśród tych szesnastu równań jest dziesięć niezależnych równań.

16 Z wykładu na University of Glasgow, 20 czerwca 1933. Opublikowane w Albert Einstein, *The Origins of the Theory of Relativity* (Pochodzenie teorii względności), przedruk w *Mein Weltbild* (Moja wizja świata) (Amsterdam: Querido Verlag, 1934), 138; oraz w *Ideas and Opinions* (Idee i opinie) (przedruk, New York: Broadway Books, 1995), s. 289-290.

17 To jest rozwiązanie dla czasoprzestrzeni, a nie przestrzeni, a czarna dziura jako etap końcowy kolapsu została wprowadzona później.

18 Osobliwość nie jest punktem w przestrzeni, lecz osobliwym trójwymiarowym brzegiem czasoprzestrzeni. To rozróżnienie jest wyjaśnione na stronach 358-363, gdzie autor omawia tzw. diagram Kruskala, przedstawiony na ilustracji 20.2 na stronie 359.

19 Dla obserwatora zewnętrznego nastąpi to w bardzo odległej przyszłości, natomiast wpadający osiągnie i przekroczy sferę Schwarzschilda w skończonym czasie mierzonym jego zegarem.

20 Jak wiemy, horyzont zdarzeń jest trójwymiarową powierzchnią rozciągającą się w czasie od minus do plus nieskończoności. W danej chwili horyzont tworzy dwuwymiarową powierzchnię, sferę, zwaną powierzchnią horyzontu.

21 Informacja prywatna od Dona Page'a, studenta Hawkinga. Opowiedział tę historię w *Hawking Radiation and Black Hole Thermodynamics* (Promieniowanie Hawkinga a termodynamika czarnej dziury), Alberta University, September 2004. Opublikowane w „New Journal of Physics", 7, 2005, s. 203, ALBERTA-THY-18-04, DOI:10.1088/I367-2630/7/1/203, e-Print: hep-th/0409024 | PDF. Ta wersja jest zgodna z opisem samego Hawkinga w jego książce *Krótka historia czasu*.

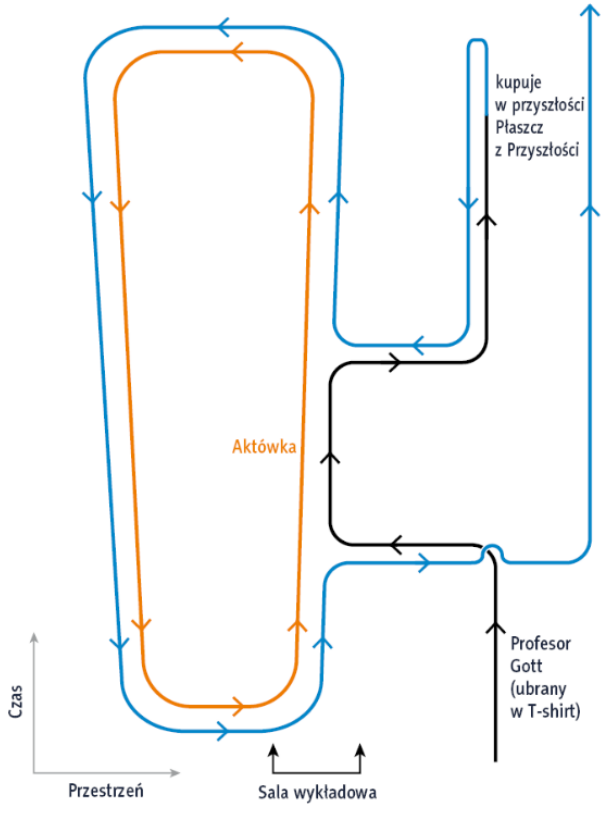
21 – Kosmiczne struny, tunele czasoprzestrzenne i podróże w czasie

J. Richard Gott

Moje prace dotyczą podróży w czasie w ogólnej teorii względności, więc okoliczne dzieciaki sądzą, że w garażu trzymam wehikuł czasu. Kiedyś uczestniczyłem w konferencji kosmologicznej w Kalifornii i tak się złożyło, że miałem na sobie turkusowy, sportowy płaszcz. Jeden z kolegów, Robert Kirshner, ówczesny szef wydziału astronomii na Harvardzie, podszedł do mnie i powiedział: „Rich, chyba kupiłeś ten płaszcz w przyszłości i przywiozłeś go z powrotem, bo ten kolor nie został jeszcze wynaleziony!". Od tego czasu płaszcz jest znany jako Płaszcz z Przyszłości i noszę go zawsze, gdy mam wykłady na temat podróży w czasie.

Zazwyczaj zaczynam swój wykład o podróżach w czasie, wchodząc na salę w moim turkusowym płaszczu i niosąc brązową aktówkę. Chowam aktówkę w szafce i szybko wychodzę. Wracam ubrany w T-shirt. Wyjaśniam widowni, że muszę się udać na inne spotkanie, ale zaaranżowałem innego wykładowcę, który mnie zastąpi, i ponownie wychodzę. Za chwilę wracam po raz drugi, ubrany w turkusowy płaszcz, i mówię, że jest to Płaszcz z Przyszłości. Wyjaśniam, że nie mogłem wygłosić wykładu, ponieważ w tym samym czasie musiałem się udać na inne spotkanie; ale posiadam wehikuł czasu, więc po zakończeniu tamtego spotkania mogłem po prostu wybrać się w przyszłość, kupić w przyszłości Płaszcz z Przyszłości, a następnie wrócić i wygłosić wykład jako starsza wersja mnie samego!

W tym momencie zauważam, że zapomniałem przynieść notatki do mojego wykładu o podróżach w czasie. Co zrobić? Skoro mam wehikuł czasu, mogę je zabrać następnego dnia (po wykładzie) i wrócić w czasie, aby przed wykładem schować aktówkę z notatkami gdzieś na sali wykładowej. Rozglądam się, ale nie widzę notatek. Musiałem je gdzieś schować. Jest tu jakieś miejsce, gdzie mogłem je schować? Może w tej szafce. Otwieram szafkę, znajduję aktówkę i otwieram ją. Są! Moje notatki o podróżach w czasie są w środku.



ILUSTRACJA 21.1. Diagram czasoprzestrzenny wykładu profesora Gotta o podróżach w czasie

Credit: J. Richard Gott

Zobaczmy, co tu się dzieje, śledząc linie świata na diagramie czasoprzestrzennym (il. 21.1). Na osi poziomej jest wymiar przestrzenny, na pionowej jest czas, przyszłość jest ku górze. Pionowy pas w środku diagramu reprezentuje salę, w której odbywa się wykład. Czarno-turkusowa linia reprezentuje moją linię świata.

Początkowo jestem poza salą. Wkładam biały T-shirt, wchodzę na salę i mówię, że nie mogę wygłosić wykładu, ponieważ muszę iść na spotkanie. Wychodzę, idę na spotkanie, a następnie przenoszę się w przyszłość, gdzie kupuję Płaszcz z Przyszłości. Moja linia świata zmienia kolor na turkusowy. Wracam w odpowiednim czasie, wchodzę na salę i wygłaszam wykład. Po wykładzie muszę się przenieść w przeszłość, do czasu przed wykładem, aby wnieść na salę notatki. Wchodzę na salę i szybko wychodzę, zanim na salę wkroczy moje drugie, młodsze wcielenie, ubrane w T-shirt. Moja linia życia miała skomplikowany przebieg, ale od tego momentu biegnie dalej w przyszłość.

A jaki przebieg ma linia życia aktówki? Wyjmuję ją z szafki i mam ją obok cały czas w trakcie wykładu. Następnie zabieram ją ze sobą, gdy po wykładzie przenoszę się w przeszłość, aby wcześniej, przed wykładem wnieść ją na salę, gdzie pozostanie do momentu, aż znajdę ją w szafce. Linia świata aktówki tworzy zamkniętą pętlę (pomarańczowa linia na diagramie). Jest nietypowa, gdyż nie ma początku ani końca. Moja linia świata ma początek, gdy się urodziłem, i ma koniec, gdy umrę, ale linia świata aktówki tworzy zamkniętą

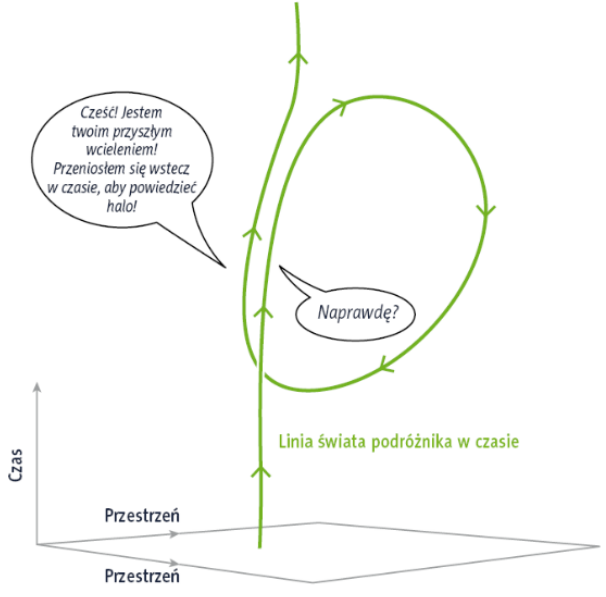
pętlę. Takie cząstki jak moja aktówka nazywamy dżinnami lub dżinami (nazwa pochodzi od demonów w arabskiej mitologii).

Aktówka nigdy nie znika z mojego pola widzenia. Nigdy nie znajduje się w fabryce aktówek. Fizycy, którzy zajmują się podróżami w czasie, mają do czynienia z cząstkami dżinnami, gdy rozważają efekty kwantowe. Co będzie, gdy na aktówce pojawi się otarcie, jeśli przez nieuwagę zahaczę nią o drzwi? Igor Novikov zwrócił uwagę, że wszelkie uszkodzenia cząstek dżinnów muszą zostać naprawione w pewnym punkcie swojej linii życia i wrócić do oryginalnego stanu — moja aktówka nie jest tu wyjątkiem. To nie narusza praw dotyczących entropii, ponieważ aktówka nie jest izolowanym układem; energia niezbędna do naprawy aktówki pochodzi z zewnątrz.

Informacja też może być dżinnem. Wyobraźmy sobie, że przenoszę się w czasie do roku 1915 i podaję Einsteinowi poprawne równania pola ogólnej teorii względności, a on pisze artykuł i publikuje równania. Skąd pochodzi informacja? Ja poznałem równania, czytając artykuł Einsteina, a on poznał je ode mnie — linia świata równań tworzy zamkniętą pętlę.

Na gruncie praw fizyki istnienie cząstek dżinn jest możliwe, aczkolwiek mało prawdopodobne — im bardziej złożona i masywna cząstka, tym mniej prawdopodobna. Mógłbym opowiedzieć taką samą historię, gdybym na podłodze sali wykładowej znalazł spinacz do papieru, zabrał go ze sobą zamiast aktówki, przeniósł się w przeszłość i umieścił spinacz na podłodze w tym samym miejscu, w którym go znalazłem. Wtedy spinacz byłby dżinnem, prostszą i mniej masywną cząstką niż aktówka. Jeszcze prostszą cząstką dżinn byłby elektron — mógłbym znaleźć elektron, przenieść go w przeszłość i umieścić na sali wykładowej. Znalezienie cząstki tak dużej i tak złożonej jak aktówka jest mniej prawdopodobne, a jeszcze mniej prawdopodobne jest znalezienie takiej, która zawiera dokładnie te notatki, których potrzebuję do mojego wykładu. Myślę, że takie złożone dżinny są możliwe, ale bardzo mało prawdopodobne.

Podróż w czasie zdarza się wtedy, gdy twoja linia świata tworzy pętlę, natomiast normalny stan rzeczy pokazuje ilustracja 18.1, na której linie świata Ziemi i innych planet tworzą helisy wokół linii świata Słońca. Nic nie porusza się szybciej niż światło, a wszystkie linie świata biegną ku przyszłości. Ilustracja 21.2 pokazuje podróż w czasie do przeszłości. Aby uczestniczyć w zdarzeniu w przeszłości podróżnika, jego linia świata tworzy pętlę.



ILUSTRACJA 21.2. Diagram czasoprzestrzenny linii świata podróżnika w czasie

Credit: J. Richard Gott, *Time Travel in Einstein's Universe*, Houghton Mifflin, 2001

Podróżnik w czasie zaczyna u dołu w przeszłości i podąża do góry, aż napotka linię świata swojego starszego wcielenia, które mówi: „Cześć! Jestem twoim przyszłym wcieleniem! Przeniosłem się wstecz w czasie, aby powiedzieć halo!". Podróżnik odpowiada: „Naprawdę?" i wykonuje pętlę w przeszłość. Napotyka wtedy swoje młodsze wcielenie i mówi: „Cześć! Jestem twoim przyszłym wcieleniem! Przeniosłem się wstecz w czasie, aby powiedzieć halo!". Jego młodsze wcielenie odpowiada: „Naprawdę?". Podróżnik w czasie uczestniczy w zdarzeniu dwukrotnie, raz jako młodsze, a raz jako starsze wcielenie, ale samo zdarzenie zachodzi jeden raz. Możesz sobie to wyobrazić jako czterowymiarową rzeźbę utworzoną przez linie świata. Jeżeli chcesz wiedzieć, jak się doświadcza takich zdarzeń, musisz prześledzić swoją linię świata, aby zobaczyć, czyje linie świata spotykają się z twoją.

To prowadzi nas do rozważenia słynnego paradoksu babci: co będzie, jeżeli przeniosę się wstecz w czasie i przypadkowo zabiję moją babcię, zanim ona urodzi moją matkę? Wtedy babcia nie urodzi mojej matki, więc moja matka nie może urodzić mnie, więc ja nie mogę istnieć; a skoro ja nie istnieję, to nie mogę przenieść się wstecz w czasie i zabić swojej babci, co z kolei oznacza, że moja babcia ma się dobrze, może urodzić moją matkę, a moja matka jednak mnie urodzi. Powstaje paradoks. Konserwatywne rozwiązanie paradoksu babci polega na tym, że podróżnicy w czasie nie mogą zmieniać przeszłości, ponieważ zawsze byli częścią przeszłości. Mogłeś przenieść się w czasie w przeszłość, wypić z babcią herbatę i zjeść ciasteczka jako małe dziecko, ale nie mogłeś jej zabić, ponieważ ona urodziła twoją matkę, a matka urodziła ciebie. Rozwiązanie musi być spójne i samouzgodnione. Kip Thorne, Igor Novikov i ich współpracownicy wymyślili zestaw eksperymentów myślowych dotyczących podróżujących w czasie i zderzających się kul bilardowych, aby pokazać, że znalezienie samouzgodnionego rozwiązania, wolnego od paradoksów, jest zawsze możliwe.

Nie musisz się martwić, że zmienisz historię — niezależnie od tego, jak bardzo się starasz, nie zmienisz niczego. Gdybyś przeniósł się w przeszłość na statek „Titanic", aby ostrzec kapitana o górach lodowych, kapitan zignorowałby twoje ostrzeżenie, podobnie jak zignorował wszystkie inne ostrzeżenia o górach lodowych, ponieważ wiemy, że statek zatonął. Zmiana przebiegu zdarzeń okazałaby się niemożliwa. Podróże w czasie w filmie *Wspaniała przygoda Billa i Teda* są zbudowane na tej samej zasadzie samouzgodnienia.

Alternatywnym rozwiązaniem paradoksu babci jest interpretacja wielu światów mechaniki kwantowej Everetta. Opinie na jej temat wśród fizyków są dość rozbieżne, ale najpierw zobaczmy, jak to działa. W teorii wielu światów istnieje wiele równoległych światów, jak tory kolejowe na dużej stacji. My widzimy jedną historię, jakbyśmy jechali wzdłuż jednej linii torów. Zdarzenia, które widzimy, są jak mijane stacje: tu jest druga wojna światowa, tutaj są ludzie, którzy lądują na Księżycu i tak dalej. Ale istnieje wiele równoległych światów. Istnieje świat, w którym druga wojna światowa nigdy się nie zdarzyła. Ta idea jest oparta na sformułowaniu mechaniki kwantowej w formalizmie wielu historii Richarda Feynmana: aby obliczyć prawdopodobieństwo określonego wyniku przyszłego eksperymentu, musisz rozważyć wszystkie możliwe historie, które prowadzą do tego wyniku. Niektórzy ludzie sądzą, że jest to tylko jedna z dziwnych reguł wykonywania obliczeń w mechanice kwantowej, ale proponenci modelu wielu światów uważają, że wszystkie te historie są realne, i że oddziałują ze sobą. David Deutsch twierdzi, że podróżnik w czasie mógłby przenieść się wstecz w czasie i zabić swoją babcię jako małą dziewczynkę. Spowodowałby utworzenie nowej gałęzi historii, w której istniałby podróżnik w czasie i martwa babcia. Istniałaby też gałąź, w której podróżnik się urodził, a jego babcia żyła długo i szczęśliwie. Obie wersje nadal istnieją i w obu wersjach podróżnik zachowuje pamięć swojej historii sprzed momentu rozgałęzienia.

Mamy teraz dwa rozwiązania paradoksu babci: konserwatywne, w którym istnieje pojedyncza, samouzgodniona, czterowymiarowa, niezmienna rzeźba; oraz bardziej radykalna interpretacja — teoria wielu światów mechaniki kwantowej. Oba rozwiązania działają.

Jeżeli teraz powrócimy do podróżnika w czasie, którego linia świata tworzy pętlę wnikającą w przeszłość, to zauważymy, że jedna rzecz się nie zgadza. Gdy podróżnik w czasie zawraca u góry diagramu, aby powrócić do przeszłości, w pewnym miejscu nachylenie jego linii świata względem osi czasu musi być większe od 45^0, co oznacza, że przekracza wtedy prędkość światła. W punkcie diagramu położonym najdalej ku górze jego prędkość jest w istocie nieskończona. Związek między poruszaniem się z prędkością większą od prędkości światła i podróżami w czasie w przeszłość jest widoczny w limeryku A.H.R. Bullera:

There was a young lady named Bright
Whose speed was faster than light.
She went out one day
In a relative way,

And returned the previous night.

Pani N. to taki prędki typ, że
gdy ją zew płci dziś wieczorem przyprze,
wróci, jak u Einsteina,
wczoraj rano; zwyczajna
rzecz, gdy tempo od światła jest szybsze[1].

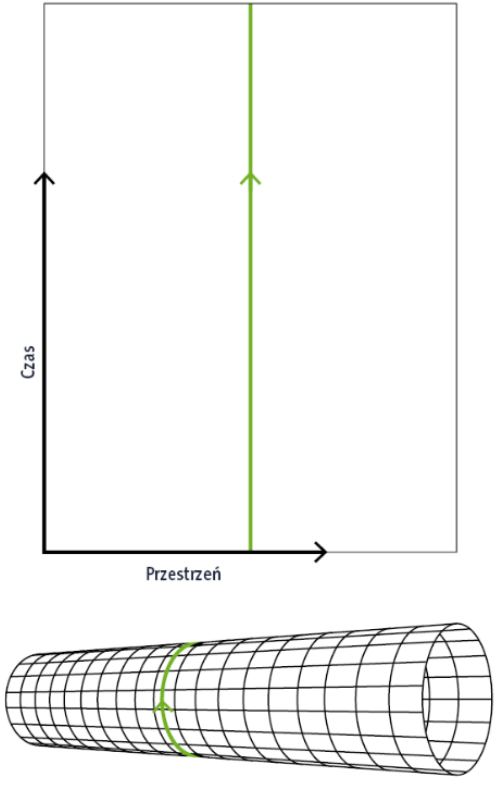
Problem polega na tym, że Einstein udowodnił na gruncie szczególnej teorii względności, że nie da się zbudować rakiety poruszającej się z prędkością większą od prędkości światła. A jeżeli zawsze poruszasz się z prędkością mniejszą od prędkości światła, twoja linia świata nigdy nie odchyla się od osi czasu bardziej niż o 45°, więc nie możesz zawrócić do przeszłości. Ale w ogólnej teorii względności, w której czasoprzestrzeń jest zakrzywiona, możesz wyprzedzić wiązkę światła na skróty albo przez tunel czasoprzestrzenny, albo (jak zobaczymy) wzdłuż kosmicznej struny. A jeżeli możesz wyprzedzić wiązkę światła, to — podobnie jak panna Bright — możesz podróżować wstecz w czasie.

Przypuśćmy, że masz kartkę papieru, której pozioma krawędź reprezentuje jeden wymiar przestrzenny, a krawędź pionowa reprezentuje czas (il. 21.3). Twoja linia świata jest wtedy tą zieloną linią na środku kartki. Jesteś leniwy, cały czas siedzisz w domu, więc twoja linia świata biegnie prosto od dołu do góry kartki. Ale w zakrzywionej czasoprzestrzeni reguły są inne. Zwińmy kartkę w poziomy cylinder, sklejając dolną i górną krawędź. Teraz twoja linia świata jest okręgiem, który powraca do przeszłości.

Poruszasz się wciąż do przodu — do przyszłości, ale twój okrąg prowadzi cię do przeszłości. To samo przydarzyło się załodze Magellana. Poruszali się wciąż na zachód, prosto na zachód, ale wokół zakrzywionej powierzchni Ziemi dotarli z powrotem do Europy. Nie doszłoby do tego, gdyby powierzchnia Ziemi była płaska. Na takiej samej zasadzie podróżniczka w czasie zawsze porusza się do przyszłości, ale jeżeli czasoprzestrzeń jest dostatecznie zakrzywiona, podróżniczka może powrócić do zdarzeń w jej własnej przeszłości.

Niektóre rozwiązania równań ogólnej teorii względności dopuszczają takie sytuacje. Zanim się nimi zajmiemy, chciałbym omówić pojęcie kosmicznej struny. W 1985 roku odkryłem dokładne rozwiązanie równań Einsteina dla geometrii wokół kosmicznej struny. Alex Vilenkin z Tufts University znalazł przybliżone rozwiązanie, ja znalazłem dokładne. William Hiscock z Montana State University znalazł to samo dokładne rozwiązanie niezależnie ode mnie, więc jesteśmy współautorami tego odkrycia. Rozwiązanie opisuje geometrię wokół kosmicznej struny.

Ale co to jest kosmiczna struna? Jest to cienka (węższa niż jądro atomowe) nić energii kwantowej próżni, o wysokiej gęstości energii i wysokim naprężeniu, która może być pozostałością po Wielkim Wybuchu. Wiele teorii w fizyce cząstek przewiduje istnienie takich strun. Nie znaleźliśmy ich jeszcze, ale wciąż szukamy.



ILUSTRACJA 21.3. W zakrzywionej czasoprzestrzeni dopuszczalna jest linia świata, która zawraca do przeszłości

Credit: J. Richard Gott, *Time Travel in Einstein's Universe*, Houghton Mifflin, 2001

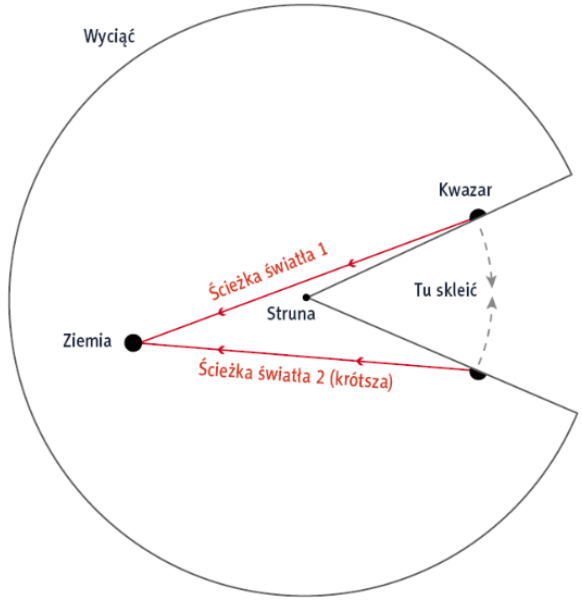
Fizycy wiedzą, że próżnia (pusta przestrzeń pozbawiona cząstek i fotonów) może mieć energię wynikającą z obecności pola przenikającego przestrzeń. Ta koncepcja pojawiła się między innymi w związku z niedawno odkrytym polem Higgsa oraz bozonem Higgsa. Gdy bozon Higgsa został odkryty w akceleratorze Large Hadron Collider (Wielkim Zderzaczu Hadronów), François Englert i Peter Higgs otrzymali w 2013 roku nagrodę Nobla z fizyki za teoretyczne prace, w których przewidzieli istnienie tego bozonu. W rozdziale 23 omówimy hipotezy, zgodnie z którymi wczesny Wszechświat miał wysoką energię próżni. Gdy ten stan próżni rozpadł się na normalne cząstki, część jego energii mogła zostać uwięziona w cienkich niciach o wysokiej gęstości energii próżni — w kosmicznych strunach. Gdy pole śniegu topi się na wiosnę, bałwany śnieżne pozostają nieco dłużej. Na podobnej zasadzie kosmiczne struny pozostały jako energia próżni wczesnego Wszechświata.

Kosmiczne struny nie mają końców. Albo są nieskończone, jeżeli Wszechświat jest przestrzennie nieskończony, albo istnieją w postaci zamkniętych pętli. Wyobraź sobie (nieskończenie długie) nitki spaghetti oraz SpaghettiOs. Spodziewamy się, że istnieją zarówno nieskończenie długie struny kosmiczne, jak i struny kosmiczne tworzące pętle. Większość masy w sieci kosmicznych strun jest zawarta w nieskończenie długich strunach.

W kwestii geometrii przestrzeni wokół kosmicznych strun możemy zadać pytanie: jak wygląda przekrój płaszczyzną prostopadłą do struny? Możesz się spodziewać, że wygląda jak kawałek papieru z kropką w środku, gdzie

przechodzi struna. Ale kosmiczna struna jest bardzo masywna — około miliona miliardów (10^{15}) ton na centymetr — więc znacząco zakrzywia przestrzeń wokół siebie. Nie wygląda zatem jak kawałek papieru z kropką w środku, lecz jak pizza z brakującym jednym kawałkiem (il. 21.4).

Kupujesz pizzę, wycinasz jeden kawałek i zjadasz go albo wyrzucasz. Nie ma go. Resztę pizzy ostrożnie chwytasz za dwie krawędzie w miejscu, gdzie był zjedzony kawałek. Przyciągasz jedną krawędź do drugiej, aż się zetkną, a pizza utworzy stożek. To jest przekrój geometrii wokół struny, w kształcie stożka, a sama struna przenika przez środek pizzy. Stożkowy kształt wskazuje, że obwód nie jest równy 2π razy promień pizzy, ponieważ brakuje jednego kawałka — obwód jest mniejszy, niż byłby, gdyby wszystkie kawałki były na miejscu. Widać, że ta geometria nie spełnia reguł geometrii euklidesowej dla płaskiej płaszczyzny.



ILUSTRACJA 21.4. Geometria przestrzeni wokół kosmicznej struny

Credit: J. Richard Gott, *Time Travel in Einstein's Universe*, Houghton Mifflin, 2001

Szerokość kątowa brakującego kawałka jest proporcjonalna do masy na jednostkę długości struny. Dla kosmicznych strun, które mogły powstać we wczesnym Wszechświecie (teorie wielkiej unifikacji w fizyce cząstek przewidują, że struny powstawały w epoce, gdy unifikacja słabych, silnych i elektromagnetycznych oddziaływań zaczęła się załamywać), ten kąt jest w

istocie bardzo mały — może mieć około połowy sekundy kątowej lub mniej. To bardzo mały kąt, ale mimo to jego detekcja jest możliwa.

Na ilustracji 21.4 struna jest w środku, a w miejscu brakującego kawałka dwie krawędzie pizzy są sklejone. Załóżmy, że siedzę na Ziemi i obserwuję kwazar, który znajduje się za struną. Światło kwazara może do mnie dotrzeć jedną z dwóch trajektorii (ścieżką światła 1 lub ścieżką światła 2). Jeżeli skleisz dwie krawędzie pizzy w miejscu brakującego kawałka, powstanie stożek. Przy przejściu w pobliżu struny obie wiązki światła zostaną ugięte w wyniku grawitacyjnego soczewkowania. To taki sam efekt jak ugięcie światła przy przejściu w pobliżu Słońca, które opisaliśmy w rozdziale 19. Trajektorie obu wiązek światła są jednak tak proste, jak tylko jest to możliwe w zakrzywionej czasoprzestrzeni. Narysowałem je od linijki. Gdy papierowy model pizzy zostanie sklejony w stożek, możesz użyć modeli ciężarówek i przejechać nimi od kwazara do Ziemi wzdłuż ścieżki światła 1 lub wzdłuż ścieżki światła 2, cały czas trzymając przednie koła ustawione na wprost. Obie trajektorie są proste (są liniami geodezyjnymi). Po przejściu wokół struny obie wiązki światła docierają do Ziemi wzdłuż linii prostych, więc obserwator na Ziemi widzi dwa bliźniacze obrazy kwazara po dwóch stronach kosmicznej struny. Możemy zatem poszukiwać kosmicznych strun, wypatrując na niebie kwazarów widocznych jako para obrazów po przeciwnych stronach kosmicznej struny, jak para guzików na dwurzędowej marynarce. Nie znaleźliśmy jeszcze ani jednego obrazu kwazara zogniskowanego przez kosmiczną strunę, ale nadal szukamy.

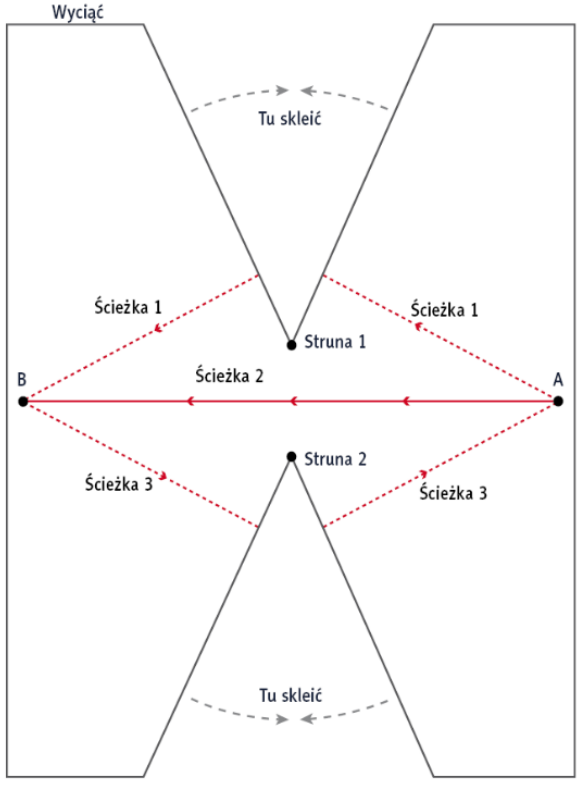
Godną uwagi cechą tej hipotezy jest fakt, że dwie ścieżki światła mogą mieć różną długość. Na ilustracji 21.4 ścieżka 2 jest nieco krótsza od ścieżki 1, więc gdybym wyruszył moim statkiem kosmicznym od kwazara w stronę Ziemi i z prędkością 99,9999999999% prędkości światła przeleciał ścieżką 2, mógłbym wyprzedzić wiązkę światła lecącą wzdłuż ścieżki 1, ponieważ światło miałoby do pokonania dłuższą drogę. Mógłbym wyprzedzić wiązkę światła, lecąc na skróty!

Kosmicznych strun jeszcze nie zaobserwowaliśmy, ale zjawisko grawitacyjnego soczewkowania owszem, z tym że rolę soczewki odegrała galaktyka położona między nami i kwazarem. Widzimy dwa obrazy odległego kwazara QSO 0957+561, po przeciwnych stronach soczewkującej galaktyki. Zakrzywienie czasoprzestrzeni przez galaktykę powoduje ugięcie światła. Na takiej samej zasadzie światło uległoby ugięciu przy przejściu w sąsiedztwie kosmicznej struny. QSO 0957+561 jest kwazarem o zmiennej jasności. Zespół astronomów, którym kierowali Ed Turner, Tomislav Kundić i Wes Colley (w którym ja także uczestniczyłem), zarejestrował nagły wzrost jasności kwazara na obu obrazach, co umożliwiło zmierzenie różnicy czasu między dwoma obrazami wynoszącej 417 dni. To bardzo mały ułamek całkowitego czasu propagacji światła równy 8,9 miliarda lat. Jeżeli chcesz wiedzieć, czy możesz podróżować szybciej niż światło, to w tym przypadku odpowiedź jest pozytywna — tak, możesz! Jedna wiązka światła wyprzedziła drugą wiązkę światła o 417 dni w uczciwym wyścigu przez pustą przestrzeń, ponieważ wybrała prostą drogę na skróty.

Poszukiwanie podwójnych obrazów kwazarów jest zatem jedną z metod poszukiwania kosmicznych strun. Jak dotąd wszystkie przypadki zawdzięczamy soczewkom galaktycznym, ale nie ma w tym nic dziwnego, ponieważ zakładamy, że soczewkowanie kwazarów przez struny zdarza się rzadziej. Nadal wypatrujemy.

Kosmiczne struny charakteryzuje wysokie naprężenie i zazwyczaj poruszają się one z prędkością równą około połowy prędkości światła. Podobnie jak dwie wiązki światła mogą być ugięte ku sobie, gdy biegną po dwóch stronach kosmicznej struny, tak dwa nieruchome statki kosmiczne mogą zostać przyciągnięte ku sobie, gdy kosmiczna struna przebiegnie z dużą prędkością między nimi. Statki nabiorą prędkości i zaczną się zbliżać ku sobie, gdy struna przebiegnie między nimi. Załóżmy teraz, że jednym statkiem jest Ziemia, a drugim CMB (kosmiczne promieniowanie tła). Gdy struna się przemieszcza w pobliżu Ziemi, powoduje niewielkie przesunięcie Dopplera kosmicznego promieniowania tła. Jeżeli struna przemieszcza się od lewej do prawej między nami i CMB, to spowoduje, że CMB będzie nieznacznie gorętsze po jednej stronie (lewej) niż po drugiej. Próbujemy zaobserwować taki efekt. Oscylująca struna w kształcie pętli (jak gumka recepturka) może produkować fale grawitacyjne. W przyszłości będziemy mogli poszukiwać tych zjawisk przy użyciu orbitalnych wersji takich teleskopów jak LIGO. Jak widać, mamy kilka obiecujących sposobów poszukiwania kosmicznych strun.

W jaki sposób moglibyśmy wykorzystać opisany powyżej efekt „skrótu” dla jednej struny? W 1991 roku znalazłem dokładne rozwiązanie polowych równań Einsteina w ogólnej teorii względności dla dwóch poruszających się kosmicznych strun. W tym przykładzie (il. 21.5) dwie równoległe kosmiczne struny mijają się jak maszty dwóch mijających się w nocy szkunerów. Struna 1, ustawiona pionowo, porusza się od lewej do prawej, a struna 2, również ustawiona pionowo, porusza się od prawej do lewej. Jak wygląda geometria wokół takich dwóch strun?



ILUSTRACJA 21.5. Geometria przestrzeni wokół dwóch kosmicznych strun

Credit: J. Richard Gott, *Time Travel in Einstein's Universe*, Houghton Mifflin, 2001

Zapewne nie dziwi cię, że w tym przypadku brakuje dwóch kawałków pizzy. Przekrój poprzeczny przez dwie kosmiczne struny wygląda jak kawałek papieru z dwoma wycięciami. Jeżeli go złożysz, powstanie mały, papierowy statek (il. 21.5). Gdy papier jest płasko rozłożony, widoczne są dwa brakujące kawałki. Jeden zaczyna się na strunie 1 i rozciąga się ku górze na ilustracji, a drugi zaczyna się na strunie 2 i rozciąga się w dół ilustracji. Obie struny są skierowane prostopadle do powierzchni ilustracji. Teraz mamy dwa skróty do wyboru. Jeżeli startujesz z planety A, możesz lecieć do planety B wzdłuż linii oznaczonej jako ścieżka 2, wytyczonej prosto między dwiema kosmicznymi strunami. Ale istnieje krótsza, lecz również prosta droga, wzdłuż ścieżki 1, którą możesz szybciej dotrzeć do planety B, lecąc wokół struny 1. Istnieje także drugi skrót, prosta droga wzdłuż ścieżki 3, którą możesz wrócić z planety B do planety A, lecąc wokół struny 2, szybciej niż gdybyś wracał wzdłuż ścieżki 2. Jeżeli wystartujesz z planety A i wyruszysz do planety B, lecąc z prędkością 99,9999999999% prędkości światła, możesz wyprzedzić wiązkę światła lecącą bezpośrednio wzdłuż ścieżki 2. Ścieżka 1 jest krótsza od ścieżki 2, ponieważ brakuje „kawałka pizzy". To oznacza, że możesz wyruszyć z planety A później niż z A wyrusza wiązka światła lecąca wzdłuż ścieżki 2, ale dotrzesz do planety B wcześniej niż światło. Twój wylot z planety A i twój przylot na planetę B są zdarzeniami, które wzdłuż ścieżki 2 są oddzielone interwałem przestrzennopodobnym: dzieli je więcej lat świetlnych w przestrzeni niż lat w czasie. Wyprzedzasz światło, czyli efektywnie poruszasz się szybciej niż światło, ponieważ wybrałeś drogę na skróty. Oznacza to także, że pewien obserwator — nazwijmy go Cosmo — poruszający się bardzo szybko w lewo, uzna te dwa zdarzenia za równoczesne. Ze względu na swoją

prędkość (dużą, ale mniejszą od prędkości światła) Cosmo kroi czasoprzestrzeń ukośnie, tak jak się kroi francuskie bochenki chleba, i uzna twój wylot z planety A oraz twój przylot na planetę B za zdarzenia równoczesne.

A teraz szybkim ruchem przesuń górną część ilustracji w prawo wraz ze ścieżką nr 1 oraz z Cosmo. Ścieżka 1 nie jest teraz nieruchoma, lecz porusza się szybko w prawo, natomiast Cosmo — ze względu na fakt, że ruch jest względny — nie porusza się w lewo, lecz jest nieruchomy w środku. Cosmo widzi twój wylot z planety A o godzinie 12.00 czasu Cosmo oraz widzi twój przylot na planetę B o godzinie 12.00 czasu Cosmo. Jeżeli możesz wykonać tę sztuczkę raz, to możesz ją także wykonać dwa razy. Szybkim ruchem przesuń dolną część ilustracji w lewo wraz ze ścieżką 2 z taką samą prędkością (lecz mniejszą od prędkości światła). Możesz wyruszyć z planety B, poruszać się wzdłuż ścieżki 3 i wyprzedzić wiązkę światła lecącą do planety A wzdłuż ścieżki 2. Twój wylot z planety B i twój powrót na planetę A dzieli więcej lat świetlnych w przestrzeni niż lat w czasie. Jeżeli dolna część ilustracji porusza się dostatecznie szybko (lecz wciąż wolniej niż światło), to z punktu widzenia Cosmo ścieżka 2 porusza się z prędkością bliską prędkości światła, a zatem Cosmo uzna twój wylot z planety B i twój przylot na planetę A za zdarzenia równoczesne. A więc jeśli widzi twój wylot z planety B o godzinie 12.00 czasu Cosmo, to widzi twój przylot na planetę A o godzinie 12.00 czasu Cosmo. Ale przecież uprzednio wyruszyłeś z planety A o godzinie 12.00 czasu Cosmo. Twój wylot z planety A i twój powrót na planetę A są zdarzeniami, które zachodzą w tym samym czasie i w tym samym miejscu. Możesz wrócić i zdążyć na czas, aby zobaczyć swoje młodsze wcielenie, uścisnąć mu rękę i pomachać na pożegnanie, zanim wyruszy w drogę! Wykonałeś rzeczywistą podróż wstecz w czasie, do zdarzenia w swojej własnej przeszłości.

A oto jak to wygląda z twojego punktu widzenia. Przybywasz na kosmodrom na planecie A. Twoje starsze wcielenie przybywa i mówi: „Halo, ja już raz okrążyłem struny!”. Odpowiadasz: „Naprawdę?”, a następnie wyruszasz w drogę wzdłuż ścieżki 1, lecisz wokół struny 1, przylatujesz na planetę B, po czym natychmiast wylatujesz z planety B, lecisz wokół struny 2 i powracasz na planetę A w samą porę, aby zobaczyć swoje młodsze wcielenie. Mówisz: „Halo, ja już raz okrążyłem struny!”. Słyszysz, jak twoje młodsze wcielenie odpowiada: „Naprawdę?”.

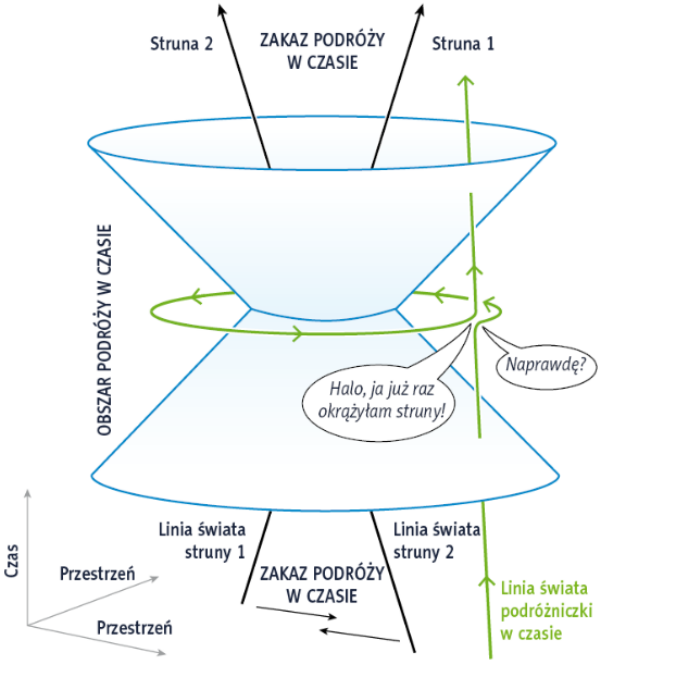
Czy spotkanie dwóch twoich wcieleń narusza zasadę zachowania energii, skoro najpierw byłeś tylko ty jeden, a teraz jest was dwóch? Nie narusza, ponieważ w ogólnej teorii względności obowiązuje tylko lokalna zasada zachowania energii. Lokalna zasada zachowania energii oznacza, że jeżeli w pomieszczeniu przybywa energii, to ktoś musi wchodzić przez drzwi. Ale ty jako podróżnik w czasie jesteś jak każdy inny podróżnik, który wchodzi przez drzwi. Masa (i, równoważnie, energia) rośnie, ponieważ wszedłeś. Lokalna zasada zachowania energii jest spełniona w tych rozwiązaniach.

Dwie struny muszą się poruszać w przeciwnych kierunkach, gdy się mijają. Wtedy jedyna rzecz, która jest ci potrzebna, to szybki statek kosmiczny, aby okrążyć struny i wrócić do tego samego punktu w czasoprzestrzeni (tego

samego miejsca i tego samego czasu), z którego wystartowałeś. Michael Lemonick napisał artykuł o moim wehikule czasu dla czasopisma „Time", w którym zamieścił moje zdjęcie z dwiema strunami i modelem statku kosmicznego.

Curt Cutler z Caltechu odkrył interesującą cechę mojego rozwiązania dla dwóch strun. Istnieje epoka, przed którą podróż w czasie w przeszłość nie była możliwa. Gdy w odległej przeszłości struny są oddalone na dużą odległość, okrążenie ich wymaga tak dużo czasu, że zawsze powrócisz na planetę A po swoim starcie. Ale gdy struny są dostatecznie blisko, gdy się mijają, możesz je okrążyć i zdążyć powrócić na czas, aby uczestniczyć w zdarzeniu ze swojej własnej przeszłości. Takie zdarzenie mieści się w obszarze, w którym podróże w czasie są możliwe. Na ilustracji 21.6 przedstawiony jest trójwymiarowy diagram czasoprzestrzenny dla dwustrunowego wehikułu czasu.

Współrzędna czasowa jest na osi pionowej. Dwie współrzędne przestrzenne są pokazane poziomo w perspektywie. Struna 1 porusza się w prawo, więc jej linia świata jest przechylona w prawo. Struna 2 porusza się w lewo, więc jej linia świata jest przechylona w lewo. Zielona linia jest linią świata podróżniczki w czasie. Początkowo podróżniczka porusza się powoli, więc zanim dotrze do planety A, jej linia świata jest prawie pionowa. Wtedy wyrusza (w samo południe), okrąża dwie struny i powraca w samo południe. Pozdrawia swoje młodsze wcielenie, a następnie resztę życia spędza na prawie pionowej linii świata. Cutler odkrył, że obszar podróży w czasie jest ograniczony przez powierzchnię zwaną horyzontem Cauchy'ego, w kształcie dwóch złączonych górnymi krawędziami kloszy do lamp. Zwróć uwagę, że podróżniczka w czasie zbliżająca się do planety A zaczyna całą podróż w odległej przeszłości, w obszarze, gdzie podróże w przeszłość są jeszcze niemożliwe. Następnie przekracza horyzont Cauchy'ego, gdzie podróże w przeszłość są już możliwe. Od tego miejsca może napotkać podróżników w czasie przybywających z przyszłości. Przez chwilę podróż w czasie jest możliwa, lecz niebawem przekroczy drugi horyzont Cauchy'ego, gdzie podróże w przeszłość są ponownie niemożliwe. Od tego miejsca nie może już napotkać podróżników w czasie przybywających z przyszłości. W tym czasie dwie kosmiczne struny są już tak daleko od siebie, że żaden podróżnik w czasie nie może ich okrążyć i powrócić w tym samym momencie, w którym wystartował.



ILUSTRACJA 21.6. Diagram czasoprzestrzenny dla dwustrunowego wehikułu czasu

Credit: J. Richard Gott, *Time Travel in Einstein's Universe*, Houghton Mifflin, 2001

To jest odpowiedź na słynne pytanie Stephena Hawkinga: „Gdzie są ci wszyscy podróżnicy w czasie?". Jeżeli podróże w czasie są możliwe, to dlaczego w znanych historycznych wydarzeniach nie uczestniczą hordy turystów w czasie przybywających z przyszłości? Dlaczego w materiałach filmowych z zabójstwa Kennedy'ego nie widzimy turystów w czasie z odległej przyszłości, w srebrnych kombinezonach i z kamerami wideo w rękach? Gdy budujesz wehikuł czasu, zakrzywiając czasoprzestrzeń, powstaje horyzont Cauchy'ego i dopiero od tego punktu możesz napotkać podróżników w czasie z przyszłości. Ale oni nie mogą podróżować wstecz w czasie, zanim wehikuł czasu nie zostanie zbudowany. Jeżeli zbudujesz wehikuł czasu w roku 3000, w zasadzie możesz go użyć do podróży wstecz w czasie z roku 3002 do roku 3001, ale nie możesz go użyć do podróży wstecz do czasu wcześniejszego niż rok 3000, ponieważ dopiero wtedy wehikuł czasu został zbudowany. Nie spotkaliśmy dotąd podróżników w czasie, ponieważ nie zbudowaliśmy jeszcze ani jednego wehikułu czasu! Dotyczy to także wehikułów czasu zbudowanych z tuneli czasoprzestrzennych i napędów warpowych, które omówimy za chwilę. Ale oznacza to także, że nawet jeżeli zbadamy naszą przeszłość i nie znajdziemy w niej podróżników w czasie z przyszłości, to my sami możemy w przyszłości przekroczyć horyzont Cauchy'ego i napotkać podróżników w czasie z przyszłości.

Kosmiczne struny mogą istnieć zarówno w postaci nieskończonych strun, takich jak te, które omawialiśmy powyżej, jak i skończonych pętli. Charakteryzuje je wysokie naprężenie i spodziewamy się, że poruszają się z prędkością równą około połowy prędkości światła. W praktyce nie należy jednak liczyć na to, że napotkamy dwie nieskończone kosmiczne struny mijające się z prędkością niezbędną do stworzenia wehikułu czasu. Kosmiczne struny, przewidziane przez teorie wielkiej unifikacji, musiałyby poruszać się z

prędkością równą co najmniej 99,9999999999% prędkości światła (nieco wolniej niż prędkość światła, ale jednak bardzo szybko), aby można je wykorzystać jako wehikuł czasu. Ale możesz znaleźć strunę w kształcie pętli i spowodować jej kolaps — pod wpływem naprężenia — wykorzystując w tym celu grawitacyjne oddziaływanie masywnych statków kosmicznych. Struna w kształcie pętli przypomina małą gumkę recepturkę. Jeżeli w pobliżu takiej pętli przeleci masywny statek, może przy odpowiednim położeniu spowodować, że struna się zatrzaśnie w taki sposób, aby dwa długie, proste odcinki struny przeleciały obok siebie z tak dużą prędkością, że powstanie wehikuł czasu. W moim artykule w „Physical Review Letters" z 1991 roku udowodniłem, że w takim przypadku pętla zapadnie się wewnątrz czarnej dziury, która powstanie wokół niej. To nie zadziała jako wehikuł czasu!

Pokazałem, że obszar dozwolonych podróży w czasie może zostać uwięziony wewnątrz czarnej dziury. Li-Xin Li i ja pokazaliśmy później, że dodatkowa masa twojej rakiety krążącej wokół strun może jeszcze bardziej zwiększyć szanse, że wokół ciebie powstanie czarna dziura.

Przy kolapsie strunowej pętli dwa długie, proste odcinki struny musiałyby przelecieć obok siebie w przeciwnych kierunkach z dużą prędkością, co oznacza, że struna musiałaby mieć moment pędu, a zatem czarna dziura, która powstała ze struny, byłaby wirującą czarną dziurą.

Omówmy zatem wirujące czarne dziury. Jak wspomniałem w rozdziale 20, dokładne rozwiązanie polowych równań Einsteina dla wirującej czarnej dziury (czyli czarnej dziury z niezerowym momentem pędu) odkrył w 1963 roku Roy Kerr. Rozwiązanie dla wnętrza wirującej czarnej dziury (wewnątrz horyzontu zdarzeń) opracował Brandon Carter. Rozwiązanie Kerra ma dwa promienie krytyczne: promień horyzontu zdarzeń r_+ oraz promień horyzontu Cauchy'ego r_-, mniejszy od promienia horyzontu zdarzeń.

W centrum czarnej dziury Kerra nie znajdziemy punktowej osobliwości, lecz osobliwość pierścieniową (ang. *ring singularity*). Zakrzywienie staje się nieskończone dopiero na tym pierścieniu (niemal nieskończone, ponieważ efekty kwantowe nieco je rozmyją). Jeżeli natrafisz na pierścień, to siły pływowe cię zabiją (jak średniowieczny stół do rozciągania plus żelazna dziewica, opisane w rozdziale 20). Co ciekawe, doktorant, który wpadł do wirującej czarnej dziury, może uniknąć pierścienia, a pierścień nie blokuje jego drogi ku przyszłości. Doktorant najpierw przekracza r_+ (horyzont zdarzeń), a następnie r_- (horyzont Cauchy'ego). Osobliwość pierścieniowa znajduje się wewnątrz horyzontu Cauchy'ego. Doktorant widzi ją od momentu, gdy przekroczy horyzont Cauchy'ego. Jeżeli doktorant przeskoczy pierścień (tak jak przeskakuje się hula-hoop), wkroczy do innego, całkiem nowego, dużego wszechświata (Wszechświata nr 1). Carter udowodnił, że jeżeli doktorant przejdzie przez pierścień do Wszechświata nr 1 i w pewien określony sposób podąży wzdłuż obwodu pierścienia po drugiej stronie, to może przeskoczyć z powrotem przez pierścień na naszą stronę, gdzie znajdzie się w czasie poprzedzającym pierwotne przejście przez pierścień. Może zatem wykonać małą pętlę w czas przeszły, powiedzieć „halo" swojemu młodszemu wcieleniu, zanim to młodsze wcielenie przekroczy pierścień po raz pierwszy.

Nikt na zewnątrz czarnej dziury nie może oczywiście tego zobaczyć, ponieważ to wszystko dzieje się wewnątrz horyzontu zdarzeń. Gdy doktorant wkroczy do wewnątrz horyzontu Cauchy'ego, znajdzie się w obszarze, gdzie podróże w czasie w przeszłość są możliwe — tak jak na ilustracji 21.6. Horyzont Cauchy'ego stanowi granicę epoki podróży w czasie, ale uwięzionej wewnątrz horyzontu zdarzeń czarnej dziury. Doktorant nigdy nie będzie mógł wrócić do naszego wszechświata, aby przechwalać się swoimi podróżami w czasie. Może natomiast kontynuować podróż w przyszłość. Na diagramie czasoprzestrzennym osobliwość pierścieniowa jest przesunięta w bok i nie blokuje drogi doktoranta ku przyszłości. Może on opuścić obszar podróży w czasie, przekraczając drugi horyzont Cauchy'ego (analogicznie jak na ilustracji 21.6), a następnie wskoczyć do kolejnego dużego wszechświata (Wszechświata nr 2), wyskakując z tak zwanej wirującej białej dziury do Wszechświata nr 2. Może tam spędzić resztę życia lub wskoczyć z powrotem do dziury i kontynuować podróż do kolejnych wszechświatów w przyszłości. To przypomina podróże windą w wielopiętrowym budynku. Wyobraź sobie, że wchodzisz do windy na parterze — to nasz wszechświat. Drzwi się zamykają i jedziesz w górę, ale bez możliwości powrotu do wszechświata na parterze — zostawiłeś go w swojej przeszłości. Na pierwszym piętrze drzwi się otwierają i widzisz nowy wszechświat (Wszechświat nr 1). Możesz opuścić windę, przeskakując przez osobliwość pierścieniową, i odwiedzić Wszechświat nr 1. Możesz pozostać we Wszechświecie nr 1 aż do śmierci lub wskoczyć z powrotem do windy, przekraczając ponownie pierścień. Jeżeli to zrobisz, winda pojedzie w górę i drzwi się otworzą na następny wszechświat (Wszechświat nr 2). Możesz wyjść i spędzić tam resztę życia lub pozostać w windzie i kontynuować jazdę ku przyszłości, spoglądając na kolejne wszechświaty przez otwierające się i zamykające drzwi windy. Nigdy jednak nie wrócisz do parterowego wszechświata (naszego wszechświata). Rozwiązanie Kerra wskazuje, że to wszystko odbywa się w wirującej czarnej dziurze, która powstała w skończonej przeszłości w naszym wszechświecie.

Musimy jednak wziąć pod uwagę pewne zastrzeżenia.

Podobnie jak w rozdziale 20 profesor pozostaje w bezpiecznej odległości poza czarną dziurą. Fotony wysyłane przez profesora i wpadające do czarnej dziury mogą dotrzeć do doktoranta nawet wtedy, gdy już przekroczy horyzont zdarzeń. Profesor może wysyłać doktorantowi wiadomości, na przykład takie jak „dobra robota" albo „kontynuuj, to będzie wspaniała praca doktorska". Doktorant odbierze je wszystkie. Między przecięciem horyzontu zdarzeń i przecięciem horyzontu Cauchy'ego, czyli dwoma zdarzeniami, które na jego zegarze zachodzą w skończonym odstępie czasu — rzędu kilku godzin dla czarnej dziury o masie kilku miliardów mas Słońca — doktorant zobaczy całą, nieskończoną, przyszłą historię naszego wszechświata na zewnątrz czarnej dziury. Nagłówki wiadomości będą do niego docierać coraz szybciej. Zgodnie z rozwiązaniem Kerra, zanim doktorant przetnie horyzont Cauchy'ego, w zasadzie dotrze do niego nieskończona liczba wiadomości z zewnątrz w skończonym czasie.

To byłaby nie lada gratka dla historyków. Gdyby doktorant chciał poznać przyszłość naszego wszechświata, mógłby przestudiować całą, nieskończoną, przyszłą historię naszego wszechświata w skończonym czasie. Ale okazuje się, że to dość niebezpieczne przedsięwzięcie! Te przyspieszające wiadomości będą nadchodzić coraz szybciej, ponieważ są niesione przez fotony coraz bardziej przesunięte ku fioletowi. Fotony są przesunięte ku fioletowi, ponieważ wpadły do wnętrza czarnej dziury i zyskały energię. Fotony są przesunięte ku fioletowi w takim samym stopniu, w jakim nadchodzące wiadomości są przyspieszone. Fotony coraz bardziej przesunięte ku fioletowi w końcu osiągną zakres promieniowania gamma, a promienie gamma mogą zabić doktoranta. Gdy doktorant będzie się zbliżał do horyzontu Cauchy'ego, fotony będą coraz bardziej przesunięte ku fioletowi (zmierzając do nieskończonego przesunięcia), aż utworzą osobliwość krzywizny (ang. *curvature singularity*) wzdłuż horyzontu Cauchy'ego, blokując drogę do obszaru podróży w czasie i innych wszechświatów w przyszłości.

Ale osobliwość wzdłuż horyzontu Cauchy'ego może być słaba. Obliczenia, które wykonał Amos Ori, wskazują, że siły pływowe mogą być za słabe, aby rozerwać twoje ciało. Siły pływowe mogą rosnąć do nieskończoności, ale będą tam tylko przez nieskończenie krótki czas. Doktorant odczuje je tak, jakby przejeżdżał przez próg zwalniający — poczuje wstrząs, ale może przeżyć. Jego ciało nie zostanie rozciągnięte nieskończenie, lecz może tylko o kilka centymetrów. To nie będzie pełna spaghettifikacja, lecz tylko ortopedyczny zabieg u kręgarza. Kolejną niewiadomą jest stabilność — wydaje się, że horyzont Cauchy'ego jest niestabilny. Fluktuacje na horyzoncie Cauchy'ego mogą tak silnie rosnąć, że część rozwiązania zostanie wypchnięta w nieprzewidywalnym kierunku. Na korzyść doktoranta przemawia także fakt, że nie znamy praw kwantowej grawitacji. Nie wiemy, jak grawitacja zachowuje się w mikroskopowych skalach. Rozwiązanie Kerra (ścisłe rozwiązanie równań ogólnej teorii względności Einsteina opisujące geometrię czasoprzestrzeni wokół wirującej czarnej dziury) nie obejmuje efektów kwantowych. Spodziewamy się, że w mikroskopowych skalach efekty kwantowe są istotne i mogą spowodować rozmycie osobliwości. To może pomóc doktorantowi przetrwać, ale skoro nie znamy praw kwantowej grawitacji, nie mamy pewności, co się z nim stanie. Gdy fizycy cząstek odkryją teorię wielkiej unifikacji, będziemy wiedzieć więcej, ale na razie wirujące czarne dziury wciąż kryją pewne tajemnice. Jednym ze sposobów, aby je odkryć, mógłby być skok do środka!

Powróćmy teraz do kosmicznej pętli strunowej, która właśnie wpadła do środka wirującej czarnej dziury i stworzyła wehikuł czasu. Horyzont Cauchy'ego dla podróży w czasie wokół strun, który odkrył Cutler, będzie się pokrywał z horyzontem Cauchy'ego, który tworzy się w wirującej czarnej dziurze Kerra. Gdy przekraczasz horyzont Cauchy'ego, trafiasz do obszaru podróży w czasie. Nie mamy wprawdzie dokładnych rozwiązań dla zapadającej się pętli strunowej, ale w 1999 roku Sören Holst i Hans-Jürgen Matschull znaleźli dokładne rozwiązanie dla tego problemu w mniejszej liczbie wymiarów (we flatlandii), gdzie dwie cząstki (ze stożkową geometrią

otoczenia — taką jak wokół kosmicznych strun) mijają się z dużą prędkością, tworząc wehikuł czasu uwięziony wewnątrz wirującej czarnej dziury!

Dla pętli strunowej musimy rozważyć wiele możliwych scenariuszy zdarzeń. Może zdołasz okrążyć pętlę kosmicznej struny i wrócić, aby uścisnąć dłoń swego młodszego wcielenia, ale znajdziesz się wewnątrz czarnej dziury i nigdy nie będziesz mógł się wydostać na zewnątrz, aby opowiedzieć przyjaciołom o swoich przygodach. Może zginiesz, gdy natrafisz na osobliwość. Jeżeli będziesz miał dużo szczęścia, może wyskoczysz w innym wszechświecie, ale nadal nie będziesz mógł wrócić, aby spotkać swoich przyjaciół. Co gorsza, możesz napotkać osobliwość i zginąć, zanim w ogóle dostaniesz się do obszaru podróży w czasie. Nie wiemy, który z powyższych scenariuszy jest możliwy.

Stephen Hawking udowodnił, że jeżeli horyzont Cauchy'ego dla podróży w czasie powstanie w skończonym obszarze, a gęstość materii nigdzie nie jest ujemna, to gdzieś na horyzoncie Cauchy'ego utworzy się osobliwość. To twierdzenie mówi w zasadzie, że trudno jest w garażu zbudować wehikuł czasu z normalnej materii wyłącznie przez łagodne zakrzywianie czasoprzestrzeni (nie dopuszczając do powstania osobliwości). W przypadku dwóch mijających się nieskończonych strun gęstość energii jest wszędzie nieujemna, ale skoro struny są nieskończone, to horyzont Cauchy'ego rozciąga się do nieskończoności i twierdzenie Hawkinga nie ma tu zastosowania. Ale w rozwiązaniu dla skończonej, kosmicznej pętli strunowej, gdzie możemy sobie wyobrażać powstanie wehikułu czasu, osobliwość może powstać na horyzoncie Cauchy'ego wewnątrz czarnej dziury. To niekonieczne cię powstrzyma, ale przynajmniej będziesz ją widział od razu po przekroczeniu horyzontu Cauchy'ego. Jeżeli jednak ten horyzont Cauchy'ego jest (jak podejrzewam) uwięziony w czarnej dziurze, a czarna dziura wyparuje w postaci promieniowania Hawkinga (co musi się stać), to kwantowy stan próżni na zewnątrz czarnej dziury ma nieznacznie negatywną gęstość energii (co powoduje, że horyzont zdarzeń się kurczy), a wtedy twierdzenie Hawkinga także nie ma zastosowania. To z kolei oznacza, że nie muszą być naruszone twierdzenia o wehikułach czasu uwięzionych wewnątrz wirującej czarnej dziury, gdzie nie zostaniesz zabity przez osobliwość, zanim przekroczysz horyzont Cauchy'ego.

Czarna dziura wyparuje w skończonym czasie, co oznacza, że przed przekroczeniem horyzontu Cauchy'ego nie zobaczysz całej historii naszego wszechświata, lecz tylko tę część historii, która zdarzy się, zanim horyzont zdarzeń czarnej dziury skurczy się do zera przez parowanie. Czyli nie zostaniesz trafiony przez nadlatujące z zewnątrz fotony arbitralnie daleko przesunięte ku fioletowi. To także sprzyjająca okoliczność.

Horyzont Cauchy'ego jest wprawdzie niestabilny, ale supercywilizacja może go ustabilizować przez aktywne zaburzanie jego stanu w odpowiedni sposób. Współczesne samoloty myśliwskie są celowo projektowane tak, że są niestabilne, ponieważ mają dzięki temu znacznie większe zdolności do manewrowania, natomiast stabilność w locie kontroluje elektroniczny system sterowania (*fly-by-wire*), działający podobnie jak twój palec, gdy trzymasz na

jego końcu długi ołówek, utrzymując go w równowadze przez szybkie ruchy palca przeciwdziałające tendencji ołówka do przechylania i do upadku. To samo robią żonglerzy.

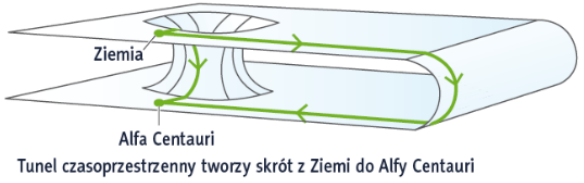
Gdybyś chciał odbyć podróż w czasie o jeden rok w przeszłość przez jednokrotne okrążenie zapadającej się kosmicznej pętli strunowej (wewnątrz czarnej dziury), musiałbyś znaleźć pętlę o masie równej około połowy masy naszej galaktyki oraz dysponować technologią, która pozwoliłaby taką pętlą manipulować. Taki projekt mogłaby przedsięwziąć tylko supercywilizacja.

Czy zginiesz, zanim w ogóle wyruszysz w podróż w czasie? Czy przeżyjesz, aby w wirującej czarnej dziurze odbyć podróż do swej własnej przeszłości? Aby odpowiedzieć na te pytania, musimy w końcu zrozumieć prawa grawitacji kwantowej, czyli jak grawitacja zachowuje się w mikroskopowych skalach. To jeden z powodów, dla których ten problem jest tak interesujący.

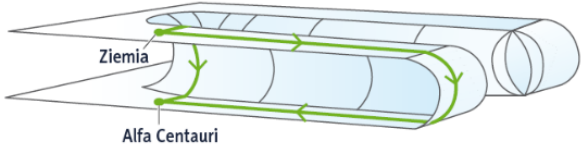
Poruszające się kosmiczne struny to niejedyne rozwiązanie równań ogólnej teorii względności, które umożliwia podróże w czasie. Pierwsze rozwiązanie dotyczyło nierozszerzającego się, ale wirującego wszechświata. Odkrył je w 1949 roku słynny matematyk, Kurt Gödel. Wprawdzie nasz wszechświat się rozszerza, a nie wiruje, lecz rozwiązanie Gödla pokazało, że podróż w czasie jest w zasadzie możliwa w ramach ogólnej teorii względności. Skoro istnieje jedno rozwiązanie, to może istnieć więcej różnych rozwiązań. W 1974 roku Frank Tipler pokazał, że nieskończenie długi, wirujący cylinder może dopuszczać podróże w czasie w przeszłość. W 1988 roku Kip Thorne i jego współpracownicy, Mike Morris i Ulvi Urtsever, zaproponowali wehikuł czasu wykorzystujący przenikalny tunel czasoprzestrzenny. W ogólnej teorii względności tunel czasoprzestrzenny to jest krótki tunel łączący dwa odległe punkty w zakrzywionej czasoprzestrzeni. Przenikalny tunel czasoprzestrzenny jest to tunel, który pozostaje otwarty dostatecznie długo, aby doktorant zdążył go przebyć (w odróżnieniu od tunelu Kruskala, który poznaliśmy w rozdziale 20). Zgodnie z naszym rozumieniem ogólnej teorii względności takie tunele mogą istnieć, aczkolwiek nie zostały jeszcze zaobserwowane. Mimo że tunel jest długi na 10 stóp, jeden jego koniec może być w pobliżu Ziemi, a drugi w pobliżu Alfy Centauri, cztery lata świetlne stąd (il. 21.7).

Jeżeli wyślesz wiązkę światła z Ziemi w kierunku Alfy Centauri, będzie potrzebowała czterech lat, aby dotrzeć do celu. Jeżeli wskoczysz do tunelu czasoprzestrzennego, będziesz tam w kilka sekund. Możesz w ten sposób wyprzedzić wiązkę światła w wyścigu do Alfy Centauri, korzystając ze skrótu przez tunel czasoprzestrzenny. Jak wygląda wejście (wlot) do tunelu czasoprzestrzennego? Na diagramie jest pokazane jako okrąg, ale ilustracja obejmuje tylko dwa wymiary przestrzenne. W rzeczywistości wejście do tunelu czasoprzestrzennego wygląda jak sfera. Jak jedna z tych błyszczących, lustrzanych kul, które czasami widzimy w czyimś ogrodzie. Poprawnie pokazano je w filmie *Interstellar*, przy którym Kip Thorne pracował jako doradca naukowy. Ale nie oczekuj, że zobaczysz w tunelu odbicie swojego ogrodu. Zobaczysz ogród na planecie krążącej wokół Alfy Centauri.

Wskakujesz do takiej kulki na Ziemi i wyskakujesz w czyimś ogrodzie, gdzieś na orbicie Alfy Centauri.



Tunel czasoprzestrzenny tworzy skrót z Ziemi do Alfy Centauri



Napęd warpowy tworzy w czasoprzestrzeni zniekształcenie w kształcie litery U, tworząc skrót z Ziemi do Alfy Centauri

ILUSTRACJA 21.7. Tunele czasoprzestrzenne i napędy warpowe

Credit: J. Richard Gott, *Time Travel in Einstein's Universe*, Houghton Mifflin, 2001

Tunel czasoprzestrzenny można zamienić w wehikuł czasu. Załóżmy, że 1 stycznia 3000 roku znajdziesz taki tunel czasoprzestrzenny. Jeżeli zajrzysz do środka, zobaczysz Alfę Centauri, ale jaka tam jest data? Jeżeli oba wejścia są zsynchronizowane, zobaczysz, że zegary na Alfie Centauri także pokazują 1 stycznia 3000 roku. To nie podróż w czasie. Ale teraz wyciągasz z hangaru masywny statek kosmiczny i grawitacyjnie ciągniesz wejście do tunelu czasoprzestrzennego wiszącego obok Ziemi na wycieczkę o 2,5 roku świetlnego tam i z powrotem z prędkością 99,5% prędkości światła. Mieszkańcy Ziemi stwierdzą, że ta wycieczka trwała łącznie trochę dłużej niż pięć lat; wejście do tunelu czasoprzestrzennego wróci na Ziemię 10 stycznia 3005 roku.

Przypuśćmy, że w środku tunelu czasoprzestrzennego siedział astronauta. W trakcie owej wycieczki widzisz, że astronauta starzeje się dziesięć razy wolniej, ponieważ podróżuje z prędkością 99,5% prędkości światła. Po powrocie będzie starszy o 5/10 roku, czyli raptem sześć miesięcy, a jego zegar będzie wskazywał 1 lipca 3000 roku. Ale tunel czasoprzestrzenny nadal ma tylko 10 stóp. Jego długość nie zmienia się w trakcie podróży, ponieważ jego geometria zależy od tego, co jest w środku tunelu, a to się nie zmieniło. Co więcej, astronauta jest w spoczynku względem wejścia na Alfie Centauri, a wejście na Alfie Centauri jest stacjonarne względem Alfy Centauri, ponieważ nic się nie porusza na tamtym końcu. To znaczy, że zegar astronauty musi być zsynchronizowany z zegarami Alfy Centauri. Jeżeli zajrzysz do tunelu czasoprzestrzennego, gdy powrócisz z wycieczki, zobaczysz, że zegar astronauty wskazuje 1 lipca 3000. Jeżeli spojrzysz na zegary Alfy Centauri za jego plecami, one również muszą wskazywać 1 lipca 3000. W takim razie, tuż po powrocie tunelu czasoprzestrzennego z wycieczki, 10 stycznia 3005 roku, zaglądasz do tunelu i widzisz zegary Alfy Centauri wskazujące 1 lipca 3000. Nadarza się okazja: wskakujesz do tunelu czasoprzestrzennego i znajdujesz się na Alfie Centauri 1 lipca 3000 roku. Łapiesz statek kosmiczny w kierunku Ziemi. Podróż zwykłym statkiem przez zwykłą przestrzeń, z prędkością 99,5%

prędkości światła, potrwa trochę dłużej niż cztery lata. Powrócisz na Ziemię 8 lipca 3004 roku, a wyruszyłeś 10 stycznia 3005 roku, więc wróciłeś wcześniej niż wyruszyłeś. Odbyłeś podróż w czasie w przeszłość. Możesz wziąć udział w zdarzeniach w swojej własnej przeszłości. Możesz uścisnąć dłoń swojemu młodszemu wcieleniu 8 lipca 3004, pół roku przed początkiem całej wyprawy. Zwróć uwagę, że nie możesz użyć tunelu czasoprzestrzennego, aby powrócić do czasu przed powstaniem wehikułu czasu — przed tym, gdy wejście do tunelu czasoprzestrzennego wiszącego obok Ziemi odbyło swoją wycieczkę. Na przykład nie możesz powrócić do czasu przed 3000 rokiem, ponieważ to byłoby wcześniej, niż nastąpiła desynchronizacja wejść do tunelu czasoprzestrzennego.

Inspiracja dla tego rodzaju badań pochodzi od Carla Sagana. W rozdziale 10 Neil opowiadał o filmie *Kontakt*. Pisząc powieść *Kontakt*, Carl chciał, aby jego bohaterka, którą w filmie grała Jodie Foster, wskoczyła do tunelu czasoprzestrzennego, którego drugi koniec znajduje się w pobliżu gwiazdy Wega, 25 lat świetlnych stąd. Carl chciał, żeby wszystko było w zgodzie z prawami fizyki, więc poprosił o pomoc swojego przyjaciela, Kipa Thorne'a. Gdy Thorne i jego współpracownicy zaczęli badania tuneli czasoprzestrzennych, przekonali się, że utrzymanie otwartych tuneli wymaga czegoś, co ma ujemną energię — wymaga egzotycznej materii o energii mniejszej od zera, czyli materii, która jest grawitacyjnie odpychająca. Światło skupia się na tunelu czasoprzestrzennym, przenika przez tunel i rozchodzi się po drugiej stronie. To jest znak firmowy ujemnej energii i jej odpychającej grawitacji. Przypomnij sobie tunel czasoprzestrzenny połączony z czarną dziurą na diagramie Kruskala. Nie mogłeś przedostać się na drugą stronę do drugiego wszechświata, ponieważ natrafiłeś na osobliwość i zostałeś rozerwany. Ale mając pod ręką egzotyczną materię o energii mniejszej od zera, możesz utrzymać otwarty tunel, co pozwoli ci przejść na drugą stronę. Ale skąd wziąć materię o ujemnej energii?

Okazuje się, że pewien kwantowy efekt, zwany efektem Casimira, jest źródłem ujemnej energii. Jeżeli umieścisz dwie równoległe, metalowe, przewodzące płyty bardzo blisko siebie, to stan kwantowej próżni między płytami ma ujemną gęstość energii. Efekty ciśnieniowe związane z efektem Casimira zostały zweryfikowane w laboratorium przez M.J. Sparnaaya i S.K. Lamoreaux. Kwantowa próżnia Hartle'a-Hawkinga wokół czarnej dziury także ma nieznacznie ujemną gęstość energii, co umożliwia parowanie czarnej dziury i zmniejszanie powierzchni jej horyzontu zdarzeń. Te dwa przykłady dowodzą, że substancje o ujemnej energii da się produkować. Thorne i jego koledzy wymyślili, że jeżeli tunel czasoprzestrzenny zablokują dwie sfery, umieszczone w tunelu jedna obok drugiej, oddalone tylko o 10^{-10} cm, to efekt Casimira między sferami pozwoli utrzymać otwarty tunel. Można wtedy otworzyć włazy w sferach i przejść przez tunel (w tych rozwiązaniach obecna jest ujemna energia, więc wehikuł czasu jest możliwy w skończonym obszarze bez osobliwości, ponieważ twierdzenie Hawkinga, które omawiałem wcześniej, nie ma zastosowania).

Dla wehikułu czasu proponowanego przez Thorne'a i jego kolegów, każde wejście do tunelu czasoprzestrzennego będzie mieć masę 100 milionów mas Słońca i promień 1 AU. Zbudowanie takiego tunelu czasoprzestrzennego to byłby dość poważny projekt, możliwy do pomyślenia chyba tylko dla jakiejś supercywilizacji. Jedyny sposób, aby to zrealizować, wymagałby znalezienia jakichś mikroskopowych, kwantowych wejść do tuneli czasoprzestrzennych oddalonych o $1{,}6 \times 10^{-33}$ cm, o średnicy $1{,}6 \times 10^{-33}$ cm, które być może istnieją w formie kwantowych fluktuacji próżni w mikroskopowych skalach. Wtedy wystarczy tylko je odsunąć i stopniowo zwiększać ich masę do 100 milionów mas Słońca. To nie jest coś, co możesz zbudować w garażu! Ale niedawne prace Maldaceny i Susskinda sugerują, że mikroskopowe tunele czasoprzestrzenne łączące kwantowo splątane cząstki mogą przynajmniej stanowić punkt wyjścia.

Kolejnym słynnym wehikułem czasu jest napęd warpowy w serialu *Star Trek*. Jest to zniekształcenie przestrzeni w kształcie litery U, które także stanowi skrót w przestrzeni, na przykład do Alfy Centauri. Nie ma czarnych dziur, jedynie zniekształcenie w kształcie U (zob. il. 21.7). Fizyk, Miguel Alcubierre, zbadał to w ramach ogólnej teorii względności i odkrył, że potrzebna jest zarówno materia o dodatniej energii, jak i o ujemnej energii, ale teoretycznie jest to możliwe.

Amos Ori zaproponował niedawno toroidalny (w kształcie precla) wehikuł czasu. Kreatywne rozwiązania równań ogólnej teorii względności dotyczące podróży w czasie są wciąż odkrywane.

Stephen Hawking uważał, że jakieś efekty kwantowe, których dotychczas nie odkryliśmy, mogą jeszcze wkroczyć, aby uniemożliwić podróże w czasie, nawet jeżeli ogólna teoria względności je dopuszcza. Sformułował swoje przypuszczenie ochrony chronologii (ang. *chronology protection conjecture*), sugerując, że prawa fizyki w jakiś sposób uniemożliwią podróże w czasie w przeszłość. Było to oczywiście tylko przypuszczenie oparte na pewnych przesłankach dotyczących kwantowego stanu próżni, który może wybuchać (co należy rozumieć jako dążenie do nieskończonych wartości mierzonych w tym stanie wielkości fizycznych), gdy zbliżamy się do horyzontu Cauchy'ego i obszaru podróży w czasie. Li-Xin Li i ja znaleźliśmy kontrprzykład, w którym inny stan kwantowej próżni nie wybucha na horyzoncie Cauchy'ego. Michael J. Cassidy, student Hawkinga, znalazł ten sam przykład na podstawie innego rozumowania. Wydaje się więc, że w pewnych sytuacjach podróże w czasie mogą być możliwe. Powtórzmy raz jeszcze — aby mieć pewność, będziemy musieli odkryć prawa grawitacji kwantowej.

W 1895 roku, gdy H.G. Wells opublikował powieść *Wehikuł czasu*, znane wówczas prawa fizyki, prawa Newtona, miały uniwersalny czas, wspólny dla wszystkich, więc podróże w czasie zarówno do przyszłości, jak i do przeszłości były zabronione. Upłynęło zaledwie dziesięć lat, gdy w 1905 roku Einstein udowodnił, że podróż w czasie do przyszłości jest możliwa. Kosmonauta, Giennadij Padałka, odbył już podróż w czasie w przyszłość o 1/44 sekundy (zob. rozdział 18). Od 1915 roku teoria grawitacji Einsteina oparta na zakrzywionej czasoprzestrzeni dopuszcza skróty umożliwiające wyprzedzenie

wiązki światła, co otwiera drzwi dla podróży w czasie w przeszłość. Obecnie znanych jest kilka rozwiązań równań Einsteina, które w zasadzie dopuszczają podróże w czasie w przeszłość. Nasza obecna sytuacja jest odwrotna do sytuacji, w jakiej znalazł się H.G. Wells, gdy pisał swą słynną powieść. W ogólnej teorii względności Einsteina, naszej najlepszej teorii grawitacji, która przeszła wszystkie testy, jakim dotychczas ją poddaliśmy, istnieją rozwiązania, w zasadzie dopuszczające podróże w czasie w przeszłość, nawet jeżeli wymagałoby to zastosowania metod i środków, na jakie może sobie pozwolić wyłącznie wysoko zaawansowana supercywilizacja. Wiemy, jak grawitacja zachowuje się w makroskopowych skalach. Wiemy także, iż w mikroskopowych skalach istotne będą efekty kwantowe, więc musimy odkryć i sformułować kwantową teorię grawitacji. Musimy skutecznie połączyć ogólną teorię względności z mechaniką kwantową i stworzyć działającą teorię, aby zrozumieć, czy rzeczywiście potrafimy skonstruować wehikuł czasu do podróży w przeszłość. Przy naszym obecnym stanie wiedzy wydaje się, że prawa fizyki dopuszczają podróże w czasie w przeszłość, ale otwarte pozostaje pytanie, czy prawa fizyki, które odkryjemy w przyszłości, uniemożliwią podróże w czasie.

Idee szczególnej i ogólnej teorii względności oraz ich związki z podróżami w czasie omówiłem w swojej książce *Time Travel in Einstein's Universe* (2001). Prowadzimy badania dotyczące podróży w czasie w ogólnej teorii względności, ale nie po to, aby zbudować wehikuł czasu, lecz aby odkryć, jak funkcjonuje Wszechświat. Rozwiązania dotyczące podróży w czasie testują prawa fizyki w ekstremalnych warunkach. W rozdziale 23 powrócimy do podróży w czasie, gdy będziemy analizować ekstremalne warunki na początku Wszechświata.

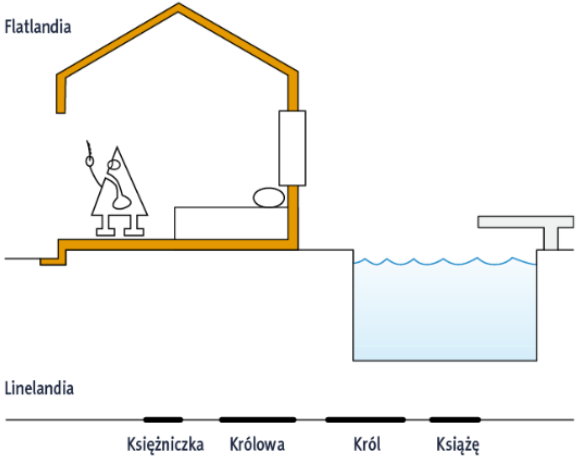
22 – Kształt Wszechświata i Wielki Wybuch

J. Richard Gott

Zanim przejdziemy do dyskusji na temat kształtu Wszechświata, powróćmy do kwestii liczby wymiarów Wszechświata. Jak już mówiliśmy, żyjemy w czterowymiarowym Wszechświecie. Aby zlokalizować jakieś zdarzenie, musisz określić cztery wymiary: trzy wymiary przestrzenne i jeden wymiar czasowy. W swojej szczególnej teorii względności Einstein pokazał, że interwały oddzielające zdarzenia (przynajmniej w płaskiej czasoprzestrzeni) mogą być wyrażone jako $\Delta s^2 = - \Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$. Znak minus przed Δt^2 odróżnia wymiar czasowy od wymiarów przestrzennych i gwarantuje, iż wszyscy obserwatorzy zgadzają się, że prędkość światła jest stała.

Możemy wyobrażać sobie wszechświaty o różnych wymiarach przestrzennych i czasowych. Wszechświat o dwóch wymiarach przestrzennych i jednym wymiarze czasowym miałby interwały wyrażone jako $\Delta s^2 = - \Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2$. Istoty żyjące w tym wszechświecie nie wiedziałyby, czym jest współrzędna z i nie znałyby takich pojęć jak „góra" i

„dół”. Te istoty żyłyby w krainie zwanej Flatlandią. Na ilustracji 22.1 widoczny jest Płaszczak (ang. Flatlander), mieszkaniec Flatlandii, stojący w swoim domu.



ILUSTRACJA 22.1. Flatlandia i Linelandia

Credit: J. Richard Gott, *Time Travel in Einstein's Universe*, Houghton Mifflin, 2001

Jego dom ma drzwi z przodu. W ogrodzie jest nawet basen, ale jeżeli Płaszczak chce popływać, musi wyjść przez frontowe drzwi, wspiąć się na dach i zanurkować z dachu do basenu. Płaszczak ma oko, z soczewką z przodu i siatkówką z tyłu. Zwróć uwagę, że widzimy w całości jego przekrój. Widzimy całe wnętrze jego ciała. Możemy łatwo zbadać jego stan zdrowia i zdiagnozować wszelkie schorzenia, ponieważ widzimy wszystkie jego wewnętrzne organy. Płaszczak ma usta, przełyk i żołądek, ale nie ma przewodu pokarmowego, który szedłby przez całe jego ciało. Gdyby miał, jego ciało rozpadłoby się na dwa kawałki! Musi trawić pokarm w żołądku i zwracać resztki. Trzyma w ręce gazetę. Nasze gazety to są dwuwymiarowe kartki papieru — jego gazeta jest jednowymiarowa jak linia. Druk składa się z kresek i kropek jak kod Morse'a. Jeżeli chce spać, musi się po prostu przewrócić na plecy na łóżko. Jak działa jego mózg? We Flatlandii nie da się zbudować neuronów (lub kabli), które się krzyżują, ale sygnały elektromagnetyczne mogą się krzyżować, więc do przesyłania sygnałów od jednej komórki do drugiej fale elektromagnetyczne mogłyby zastąpić neurony[2]. Płaszczak w zasadzie mógłby mieć mózg, ale byłoby to znacznie trudniejsze do zrealizowania.

W 1884 roku Edwin Abbott napisał cudowną książkę, *Flatland: A Romance of Many Dimensions*[3], o istotach żyjących w świecie o dwu wymiarach przestrzennych. Narrator jest kwadratem[4].

A jak wyglądałby wszechświat z jednym wymiarem przestrzennym i jednym wymiarem czasowym? To byłaby Linelandia (także pokazana na il. 22.1). Wszystko odbywałoby się na jednej linii. Mielibyśmy $\Delta s^2 = -\Delta t^2 + \Delta x^2$. Mieszkańcy byliby odcinkami. Mógłbyś mieć króla, królową, księcia i księżniczkę, ale gdybyś żył w Linelandii, widziałbyś tylko dwie osoby bezpośrednio po twojej lewej i po prawej stronie. Wyglądaliby jak punkty. Powinieneś ich polubić, ponieważ nigdy nie zobaczysz nikogo innego. Wydaje

się, że zamiar stworzenia inteligentnego życia we Flatlandii jest trudny do zrealizowania, a w Linelandii całkowicie beznadziejny.

Możemy także wyobrażać sobie wszechświaty o większej liczbie wymiarów niż ma nasz wszechświat. Załóżmy, że dołożymy jeden dodatkowy wymiar przestrzenny. Będziemy wtedy mieli: $\Delta s^2 = -\Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 + \Delta w^2$. To jest czasoprzestrzeń z czterema wymiarami przestrzennymi i jednym wymiarem czasowym; ma jeden dodatkowy wymiar przestrzenny *w*. W 1919 roku Theodor Kaluza wysunął hipotezę, że taki dodatkowy wymiar rzeczywiście istnieje. Dlaczego? Otóż Kaluza dokonał godnego uwagi spostrzeżenia. Jeżeli równania Einsteinowskiej ogólnej teorii względności zastosujesz w takiej pięciowymiarowej przestrzeni, a rozwiązanie jest jednorodne w kierunku *w*, to dostaniesz teorię, która w czterowymiarowej przestrzeni jest równoważna Einsteinowskiej ogólnej teorii względności (czyli normalną teorię grawitacji), plus równania Maxwella (zaktualizowane przez Einsteina przy użyciu szczególnej teorii względności)! Arcydzieło! Cud! Elektromagnetyzm byłby równoważny działaniu grawitacji w dodatkowym wymiarze. To byłaby unifikacja grawitacji i elektromagnetyzmu. To nie może być przypadek, że Einsteinowska ogólna teoria względności z dodatkowym wymiarem automatycznie odtwarza równania Maxwella.

To byłaby bardzo atrakcyjna teoria, ale miała jeden poważny problem — wydawało się, że nie ma najmniejszego sensu. Dlaczego nie widzimy tego dodatkowego wymiaru? W 1926 roku Oskar Klein wpadł na pomysł, że ten dodatkowy wymiar jest zwinięty jak słomka do napojów. Bądź co bądź, słomka jest dwuwymiarową powierzchnią, cylindrem wykonanym z dwuwymiarowego kawałka plastiku. Gdyby jakieś istoty żyły na powierzchni słomki, musiałyby być dwuwymiarowymi istotami. Inaczej mówiąc, byłyby Płaszczakami. Aby podać swoje położenie na powierzchni słomki, wystarczą dwie współrzędne: pionowa współrzędna, która określa, jak wysoko jesteś wzdłuż słomki, oraz kątowa współrzędna, która określa twoje położenie na obwodzie słomki. Ale jeżeli obwód jest mały, a ty patrzysz na słomkę z pewnej odległości, widzisz jednowymiarowy obiekt — jak Linelandia. Widzimy tylko makroskopowy wymiar słomki — wzdłuż jej długości. Jeżeli obwód jest mniejszy od atomu, w ogóle go nie zobaczymy.

W ten sposób teoria Kaluzy-Kleina wyjaśnia elektromagnetyzm. Dodatnio naładowane cząstki krążą wokół słomki przeciwnie do kierunku ruchu wskazówek zegara, ujemnie naładowane cząstki krążą wokół słomki zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara, neutralne cząstki — jak neutron — nie krążą. Jeżeli słomka jest wygięta w łuk, linie geodezyjne naładowanych cząstek mogą być inaczej wygięte w makroskopowych wymiarach, ponieważ mają różną początkową prędkość w tym małym, dodatkowym wymiarze. To wyjaśniałoby, dlaczego dodatnio naładowane cząstki w polu elektrycznym przyspieszają w przeciwnym makroskopowym kierunku niż ujemnie naładowane cząstki. Skoro ich prędkość w małym, zwiniętym wymiarze jest różna, to poruszają się wzdłuż innych linii geodezyjnych. Teoria wyjaśnia także, dlaczego ładunek jest skwantowany. Ze względu na falową naturę cząstek tylko całkowita liczba (1, 2, 3, ...) długości fali może się zmieścić na

obwodzie słomki. Oznacza to, że składowa pędu cząstek w kierunku *w*, zależna od długości opisującej je fali, musi być całkowitą wielokrotnością wartości odpowiadającej fali o największej długości, a więc i ładunek cząstek (równy składowej pędu w kierunku *w*) musi być całkowitą wielokrotnością ładunku protonu lub elektronu. Znając wartości ładunków elektronu i protonu, możemy obliczyć obwód słomki — wynosi 8×10^{-31} cm. To mniej niż rozmiary jądra atomowego, dlatego nie widzimy tego dodatkowego wymiaru.

Po odkryciu ogólnej teorii względności Einstein marzył o teorii wielkiej unifikacji, która miałaby zunifikować wszystkie siły w przyrodzie. Należy przyznać, że Kaluza i Klein dokonali pewnego postępu w tym kierunku: zunifikowali elektromagnetyzm i grawitację. W ramach ich teorii elektromagnetyzm to tylko grawitacja działająca w dodatkowym, zwiniętym wymiarze. Ale teoria Kaluzy-Kleina ma jeszcze jedną właściwość: obwód słomki może się zmieniać w czasie i może być różny w różnych miejscach. To jest równoważne polu skalarnemu, które może być różne w różnych punktach czasoprzestrzeni. Pole skalarne to pole, które w każdym punkcie ma wartość, ale nie ma określonego kierunku. Temperatura jest polem skalarnym. Prędkość wiatru jest polem wektorowym, ponieważ w każdym punkcie ma wartość (szybkość) oraz kierunek (na przykład północny). W tym przypadku polem skalarnym byłby obwód dodatkowego wymiaru w każdym punkcie, a zatem wartość ładunku elektrycznego w tym położeniu. Gdyby teoria Kaluzy-Kleina miała obejmować tylko ogólną teorię względności i równania Maxwella, to obwód musiałby być niezmienny, ponieważ zawsze obserwujemy taki sam ładunek każdego elektronu, niezależnie od tego, gdzie go zmierzymy. Gdyby obwód się zmieniał, ładunek elektronu by się zmieniał, czego nie obserwujemy. Z drugiej strony nie było jasne, z jakiej przyczyny obwód słomki pozostaje niezmienny. Jeżeli jest niezmienny, jak zakładano, to teoria nie daje nowych przewidywań — daje te same przewidywania jak standardowa ogólna teoria względności oraz standardowe równania Maxwella. Einstein miał szczęście — jego ogólna teoria względności dawała inne przewidywania niż teoria Newtona (dotyczące orbity Merkurego i ugięcia światła); te przewidywania mogły być przetestowane. Teoria Kaluzy-Klei-na nie dawała żadnych nowych przewidywań, więc nie mogła być przetestowana, więc Kaluza i Klein nie dostali Nagrody Nobla[5].

Dzisiaj znamy cztery siły: silne i słabe oddziaływania jądrowe, elektromagnetyzm i grawitację. Silne oddziaływanie jądrowe jest odpowiedzialne za siły wiążące nukleony w jądrach atomowych; słabe oddziaływanie jądrowe jest odpowiedzialne za niektóre formy rozpadu radioaktywnego. Steven Weinberg, Abdus Salam i Sheldon Glashow otrzymali w 1979 roku nagrodę Nobla za unifikację słabego oddziaływania i elektromagnetyzmu. Ich teoria przewiduje, że foton jest nośnikiem siły elektromagnetycznej, a jego bardziej masywni kuzyni, cząstki W_+, W_- i Z_0 są nośnikami słabego oddziaływania jądrowego. Te cząstki zostały odkryte w akceleratorze Large Hadron Collider[6] (LHC; Wielki Zderzacz Hadronów) w CERN-ie (w pobliżu Genewy); w 1984 roku Carlo Rubbia i Simon van der Meer podzielili się nagrodą Nobla za to odkrycie. Silne i słabe oddziaływania

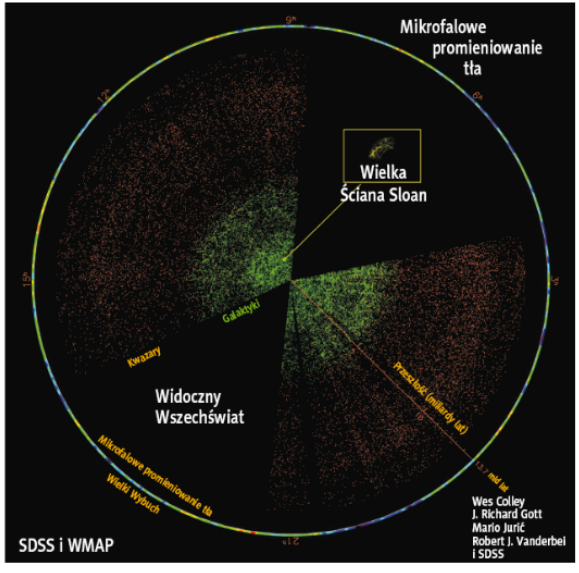
jądrowe oraz elektromagnetyzm obejmuje model standardowy fizyki cząstek. Niedawno w akceleratorze LHC został odkryty bozon Higgsa, cząstka przewidziana w ramach tego modelu. Bozon Higgsa jest cząstką związaną z polem Higgsa, polem skalarnym, które przenika przestrzeń i nadaje cząstkom W_+, W_- i Z_0 masę. Model standardowy fizyki cząstek odniósł wiele sukcesów, ale obecnie nie daje wyjaśnienia dla ciemnej materii lub dla niezerowej masy neutrin. Silne i słabe oddziaływania jądrowe oraz elektromagnetyzm nie zostały jeszcze zunifikowane z grawitacją.

Obecnie naszą największą nadzieją na teorię wielkiej unifikacji, która miałaby zunifikować wszystkie cztery siły, jest teoria superstrun. Teoria ta opiera się na idei, zgodnie z którą cząstki nie są punktowe, lecz są maleńkimi strunami o długości około 10^{-33} centymetra. Superstruny są podobne do strun kosmicznych, o których mówiliśmy wcześniej, w tym sensie, że mają dodatnią masę i naprężenie wzdłuż długości, ale zamiast mikroskopowej grubości superstruny mają zerową grubość. Różne stany wibracyjne struny odpowiadają różnym cząstkom — kwarkom, elektronom i tak dalej. Ed Witten udowodnił, że pięć różnych wersji teorii superstrun, wraz z inną teorią, zwaną supergrawitacją, stanowią w rzeczywistości graniczne przypadki jednej, bardziej ogólnej teorii, którą nazwał M-teorią. W M-teorii czasoprzestrzeń jest jedenastowymiarowa, z dziesięcioma wymiarami przestrzennymi i jednym wymiarem czasowym. M-teoria postuluje trzy makroskopowe, znane nam wymiary przestrzenne, plus siedem maleńkich, zwiniętych wymiarów przestrzennych. Gdybym miał wyjaśnić mieszkańcowi Flatlandii, czym jest słomka, powiedziałbym, że jest linią, z tym że każdy punkt na tej linii nie jest punktem, lecz maleńkim okręgiem. Gdybyśmy mieli dwa dodatkowe wymiary przestrzenne, byłaby to maleńka dwuwymiarowa powierzchnia — nie okrąg, lecz na przykład powierzchnia maleńkiego precla. W M-teorii siedem zwiniętych wymiarów istnieje w kształcie precli, których zadaniem jest wyjaśnienie silnych i słabych oddziaływań jądrowych oraz elektromagnetyzmu. Myśląc o jakimś punkcie w przestrzeni, powinieneś mieć świadomość, że w rzeczywistości jest to maleńka, siedmiowymiarowa podprzestrzeń zwinięta w kształt precla. Możliwe jest wiele kształtów. Naszym celem jest znalezienie właściwego kształtu — takiego, który wyjaśni całą fizykę cząstek.

To podobna zagadka, z jaką musieli się zmierzyć Watson i Crick, gdy próbowali odkryć strukturę molekuły DNA. Wiele kształtów było możliwych, ale jaki kształt był właściwy? Gdy w końcu rozwiązali problem, odkryta przez nich struktura stanowiła wyjaśnienie, jak dzielą się chromosomy, wytwarzając oddzielne, lecz identyczne kopie. Odpowiedzią była geometria podwójnej helisy DNA, która mogła się rozpiąć jak suwak i przyłączyć komplementarne pary zasad, tworząc dwie identyczne helisy. Na podobnej zasadzie w fizyce próbujemy odkryć mikroskopową geometrię dodatkowych wymiarów przestrzennych, które wyjaśnią znane nam oddziaływania. Wielu ludzi zajmuje się dzisiaj tym zagadnieniem, idąc drogą wytyczoną przez Kaluzę i Kleina. Lisa Randall i jej kolega, Raman Sundrum, badali, w jaki sposób dodatkowe, zwinięte wymiary mogłyby wyjaśnić, dlaczego grawitacja jest tak

słaba w porównaniu z innymi oddziaływaniami. Jeżeli ktoś odkryje wersję M-teorii z testowalnymi przewidywaniami, które będą zgodne z obserwacjami, to zrealizuje marzenie Einsteina o zunifikowanej teorii fizyki cząstek. Odkrywca takiej teorii znajdzie się w towarzystwie Newtona i Einsteina. Ekscytująca perspektywa.

Omówiwszy mikroskopowy wszechświat, jesteśmy teraz gotowi, aby przyjrzeć się makroskopowemu wszechświatowi. Chcielibyśmy mieć jedną mapę, która obejmowałaby cały Wszechświat, która pokazywałaby wszystkie interesujące rzeczy, od Kosmicznego Teleskopu Hubble'a na niskiej orbicie okołoziemskiej, przez Słońce i planety, gwiazdy i galaktyki, aż po najdalsze obiekty, które możemy zobaczyć, odległe kwazary i mikrofalowe promieniowanie tła (CMB). Problem polega na tym, że nasza Galaktyka jest maleńka w porównaniu z całym widocznym Wszechświatem, a Układ Słoneczny jest mikroskopijną kropką w porównaniu z naszą galaktyką. Odwzorowanie Wszechświata na jednej wszechstronnej mapie, pokazującej wszystko, co nas interesuje, to poważne wyzwanie.



ILUSTRACJA 22.2. Równikowy przekrój przez widoczny Wszechświat. Jesteśmy w centrum obszaru, który możemy zobaczyć. Każda zielona kropka reprezentuje galaktykę, pomarańczowa — kwazara z przesunięciem ku czerwieni zmierzonym przez Sloan Digital Sky Survey (środkowa część tego diagramu jest przedstawiona także na il. 15.4). Mikrofalowe promieniowanie tła tworzy obwód

Photo credit: J. Richard Gott, Robert J. Vanderbei, *Sizing Up the Universe*, „National Geographic", 2011 Ilustracja 22.2 pokazuje przekrój mapy całego widocznego Wszechświata obserwowanego z równika Ziemi. W środku mapy jest Ziemia. Jesteśmy w centrum widocznego Wszechświata nie dlatego, że zajmujemy w nim jakąś szczególną pozycję, ale z dość prostego powodu —

jesteśmy w środku obszaru, który możemy obserwować. Na takiej samej zasadzie, jeżeli udasz się na szczyt Empire State Building, zobaczysz ograniczony przez horyzont kołowy obszar, którego środkiem jest Empire State Building. Z tarasu widokowego na szczycie wieży Eiffla zobaczysz kołowy obszar, którego środkiem jest wieża Eiffla. Na mapie widocznego Wszechświata najdalszym obiektem, który widzimy jest CMB (zarejestrowane przez satelitę WMAP) — pokazane jako obwód diagramu. Wewnątrz tego okręgu mamy 126 594 kropki, które reprezentują galaktyki i kwazary z przeglądu Sloan Digital Sky Survey. Dwa wypełnione przez kropki wycinki koła stanowią przekrój przez obszary objęte przez przegląd. Puste wycinki koła reprezentują obszary nieobjęte przez przegląd. Widoczna jest Wielka Ściana Sloan, omawiana w rozdziale 15. Kwazary są widoczne na większych odległościach niż galaktyki. Jak wiesz, gdy patrzymy w przestrzeń, patrzymy wstecz w czasie — w przeszłość. Na ilustracji zaznaczony jest czas liczony wstecz w miliardach lat. Nasza Droga Mleczna jest tylko punktem w środku ilustracji; położenia sąsiednich gwiazd oraz planet naszego Układu Słonecznego są niewidoczne, gdyż te obiekty są mikroskopowe w tej skali.

Mapa, którą chcielibyśmy zobaczyć, powinna wyglądać tak jak słynna okładka „New Yorkera", autorstwa Saula Steinberga, zatytułowana „The View of the World from 9th Avenue" (Widok świata z 9 Alei), która pokazuje świat z punktu widzenia nowojorczyka. Na pierwszym planie rozpychają się budynki Manhattanu. Rzeka Hudson jest mniejsza, „Jersey" jest zaledwie paskiem po drugiej stronie, Środkowy Zachód jest skompresowany mniej więcej do szerokości rzeki Hudson, Ocean Spokojny jest również wąskim paskiem graniczącym z Azją na końcu ilustracji. Obiekty istotne dla nowojorczyka są pokazane w większej skali, natomiast bardziej odległe lądy są maleńkie. Tego rodzaju mapę chcielibyśmy mieć dla całego widocznego Wszechświata. Chcemy, aby obiekty Układu Słonecznego, które są dla nas istotne, były pokazane w większej skali, a bardziej odległe obiekty — w zredukowanej skali.

Gdy byłem doktorantem, w latach siedemdziesiątych, opracowałem odwzorowanie kartograficzne, które generuje taką mapę. W późniejszych latach stworzyłem kilka różnych wersji, między innymi w latach dziewięćdziesiątych zrobiłem wersję kieszonkową.

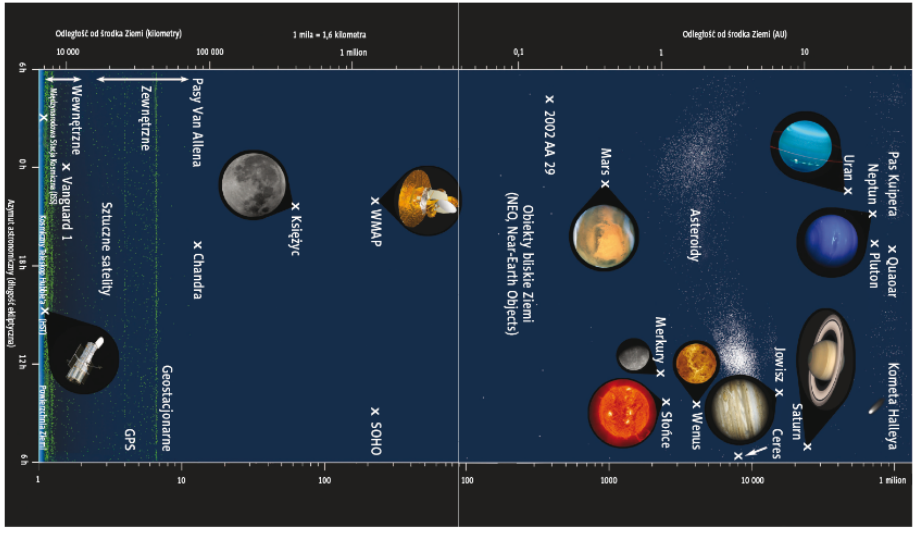
Nasza mapa Wszechświata jest konforemną mapą całego Wszechświata. Przymiotnik „konforemna" oznacza, że mapa lokalnie zachowuje kształty, podobnie jak mapa Merkatora zachowuje kształty na Ziemi. Na mapie Merkatora zarówno Islandia, jak i Kuba mają właściwe kształty. Lokalne obszary są pokazane w ich prawdziwych kształtach — nie są ani ściśnięte, ani rozciągnięte wzdłuż jednego kierunku. Między innymi z tego powodu odwzorowanie Merkatora jest użyte na mapach Google'a. Jeżeli powiększysz jakiś obszar, będzie miał właściwy kształt. Kształt jest poprawny, ale rozmiary nie. Na mapie Merkatora Grenlandia ma mniej więcej takie same rozmiary jak Ameryka Południowa, podczas gdy na globusie jest około ośmiu razy mniejsza. Moja mapa działa podobnie — obiekty położone dalej od Ziemi są przedstawione w mniejszej skali, ale mają właściwe kształty.

W 2003 roku Mario Jurić i ja zrobiliśmy profesjonalną wersję tej mapy. „New Scientist” i „New York Times” opublikowały ją w 1,5 miliona egzemplarzy. W roku 2005 opublikował ją „Astrophysical Journal”. „Los Angeles Times” porównał ją z mapą Merkatora, z mapami babilońskimi i nazwał „prawdopodobnie najbardziej oszałamiającą mapą, jaką dotychczas stworzono”. Bob Vanderbei i ja zrobiliśmy kolorową wersję w dużej skali (ta wersja, obrócona o 90°, jest pokazana na il. 22.3, s. 414-419). Obróć książkę o 90°, przeciwnie do kierunku wskazówek zegara, i odwracaj kartki, aby zobaczyć dolną, środkową i górną część mapy.

Mapa przedstawia pełną (360°) panoramę, od lewej do prawej, widzianą z równika Ziemi. Pozioma współrzędna reprezentuje azymut astronomiczny (długość ekliptyczną). Pionowa współrzędna reprezentuje odległość od Ziemi. Na osi pionowej skala jest logarytmiczna, co oznacza, że każda długa kreska na osi pionowej reprezentuje dziesięciokrotnie większą (w stosunku do poprzedniej kreski) odległość od Ziemi. Obiekty położone dziesięć razy dalej są przedstawione w skali 1/10 i tak dalej — im dalej dany obiekt jest położony, tym jest mniejszy na mapie. Powierzchnia Ziemi na równiku jest przedstawiona jako linia prosta. Widoczne są Księżyc, Słońce i planety. Znacznie wyżej są gwiazdy, poczynając od Proximy Centauri, Alfy Centauri i Syriusza. Jeszcze wyżej widzimy Drogę Mleczną. Ponad nią leżą galaktyki M31 i M81, a następnie galaktyka M87. Powyżej jest Wielka Ściana, ogromne włókno albo łańcuch galaktyk odkryty przez Margaret J. Geller i Johna Huchrę. Najdalej, w postaci linii na końcu mapy, jest CMB, najdalszy obiekt, który możemy zobaczyć, otaczający pełne 360° panoramy.

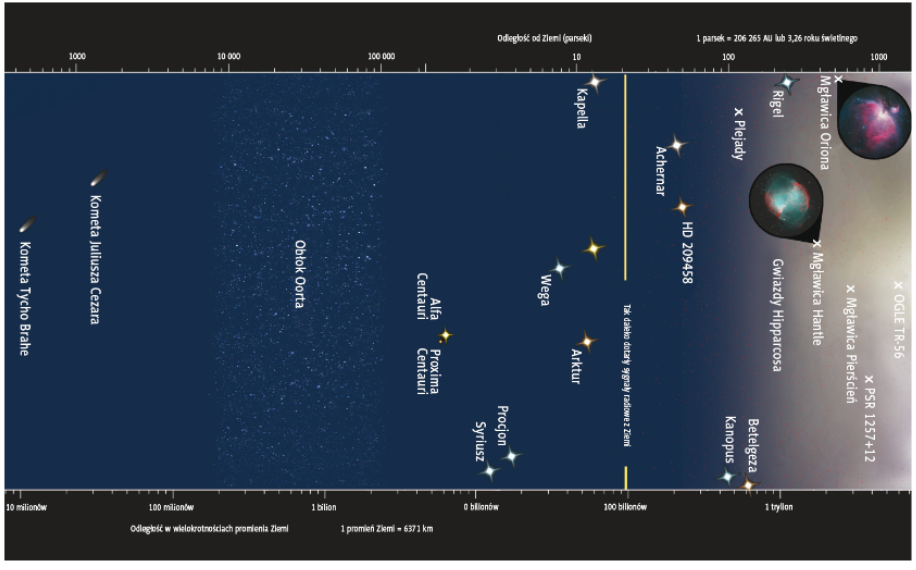
Mapa stanowi migawkę widocznego Wszechświata, wykonaną 12 sierpnia 2003 roku o godzinie 4.48 czasu Greenwich. Przedstawia wycinek nieba obejmujący kąt 4°, wycentrowany na płaszczyźnie równika Ziemi (aczkolwiek uwzględniamy także niektóre bardziej znane obiekty spoza tych granic). Satelity i planety są pokazane w ich położeniach w tym czasie; galaktyki są pokazane w odległościach, które miałyby w tym czasie — czyli są liczone we współrzędnych współporuszających się (ang. *comoving distance*). Pokazujemy wszystkie znane wówczas obiekty z Pasa Kuipera. Pokazujemy wszystkie znane asteroidy wewnątrz kąta 2° względem płaszczyzny równika. Poniżej powierzchni Ziemi byłby jej płaszcz i jądro. Atmosfera jest pokazana jako cienka, niebieska linia powyżej powierzchni Ziemi, rozciągająca się do jonosfery. Pokazujemy wszystkie 8420 sztucznych satelitów Ziemi, łącznie z Międzynarodową Stacją Kosmiczną (ISS) i Kosmicznym Teleskopem Hubble’a. Księżyc jest w pełni, 180° od Słońca. Mars jest pokazany w położeniu najbliższym Ziemi. Widoczne są także planety Merkury, Wenus, Jowisz, Saturn, Uran i Neptun. Widoczna jest Ceres, największa asteroida (945 km). Quaoar, obiekt z Pasa Kuipera, odkryty długo po Plutonie, jest pokazany wraz z samym Plutonem. Mapa obejmuje niektóre gwiazdy mające planety, takie jak HD 209458, która posiada planetę o rozmiarach Jowisza na bliskiej orbicie. Jest także czarna dziura Cygnus X-1 o masie siedmiu mas Słońca, oraz galaktyka M87, w której jądrze siedzi czarna dziura o masie 3 miliardów mas

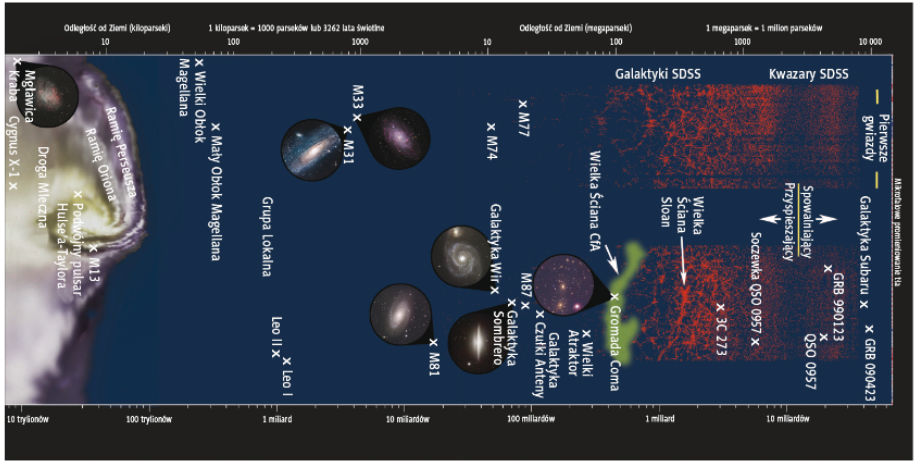
Słońca. Widoczny jest podwójny pulsar Hulse'a-Taylora, o którym wspomnieliśmy w rozdziale 11, układ dwóch gwiazd neutronowych, wykonujących synchroniczny obrót na coraz ciaśniejszej orbicie, emitujący fale grawitacyjne, tak jak przewidują równania Einsteina. Za to odkrycie Hulse i Taylor otrzymali w 1993 roku nagrodę Nobla z fizyki. 126 594 galaktyki i kwazary z przeglądu Sloan Digital Sky Survey leżą w górnej części mapy, w dwóch pionowych pasmach rozdzielonych pustymi pasami, których przegląd nie obejmował. Są to te same obszary, które na ilustracji 22.2 były reprezentowane przez puste wycinki koła, a w odwzorowaniu kartograficznym, użytym do ilustracji 22.3, mają kształt pasów.



ILUSTRACJA 22.3. Mapa Wszechświata

Photo credit: J. Richard Gott, Robert J. Vanderbei, *Sizing Up the Universe*, „National Geographic", 2011





Mapa obejmuje także Wielką Ścianę Sloan. W 2003 roku Mario Jurić i ja zmierzyliśmy jej długość wynoszącą 1,37 miliarda lat świetlnych. Była to największa znana wówczas struktura we Wszechświecie. Jest około dwóch razy dłuższa niż Wielka Ściana odkryta przez Geller i Huchrę, ale jest trzy razy dalej, więc na mapie jest pokazana w trzy razy mniejszej skali. W rezultacie na mapie długość Wielkiej Ściany Sloan stanowi około 2/3 długości Wielkiej Ściany Geller i Huchry, mimo że w rzeczywistości jest dwa razy większa. W 2006 roku Wielka Ściana Sloan znalazła się w *księdze rekordów Guinnessa*, jako największa struktura we Wszechświecie. Nigdy nie spodziewałem się, że znajdę się w *księdze rekordów Guinnessa* jeżeli nie zjem 68 hotdogów w dziesięć minut lub nie nawinę największego kłębka sznurka! Wielka Ściana Sloan dzierżyła rekord do 2015 roku, gdy odkryto jeszcze większą strukturę.

Na mapie widoczny jest 3C 273, pierwszy kwazar, którego odległość od Ziemi została zmierzona, jak opisaliśmy w rozdziale 16. Pokazana jest galaktyka Subaru, najdalsza znana wówczas galaktyka, oraz GRB 090423, źródło rozbłysków gamma, najdalszy wówczas wykryty obiekt (prawdopodobnie supernowa). U góry mapy jest CMB, najdalszy obiekt, który możemy zobaczyć. Astronomią zainteresowałem się, będąc w wieku ośmiu lat. Nie znaliśmy wtedy żadnych obiektów z Pasa Kuipera (oprócz Plutona), żadnych egzoplanet, pulsarów, czarnych dziur, kwazarów, źródeł rozbłysków gamma; nie obserwowaliśmy CMB. Ta mapa pokazuje postęp, jakiego dokonało jedno pokolenie astronomów.

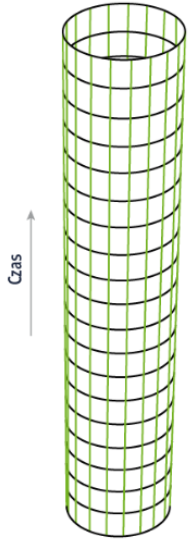
Omówimy teraz geometrię Wszechświata w dużych skalach. Gdy Einstein sformułował równania ogólnej teorii względności, próbował zastosować je w kosmologii. Równania mówią, w jaki sposób gęstość energii oraz ciśnienie zakrzywiają czasoprzestrzeń. Jedno z rozwiązań równań Einsteina opisuje płaski, pusty wszechświat, ale Einstein chciał znaleźć rozwiązanie kosmologiczne (czyli takie, które opisuje wszechświat jako całość). Napotkał problem polegający na tym, że równania nie dawały rozwiązania statycznego. Newton wyobrażał sobie statyczny, nieskończony Wszechświat, w którym gwiazdy są mniej więcej jednorodnie rozłożone. Każda gwiazda odczuwała siły przyciągania innych gwiazd, ale te siły ciągnęły jednakowo we wszystkich kierunkach, więc łącznie sumowały się do zera i gwiazda pozostawała nieruchomo w jednym miejscu. Jest to tak zwany model statyczny, który był uważany za poprawny opis Wszechświata. W czasach Newtona nie wiedziano

o istnieniu galaktyk. Idea sił działających jednakowo we wszystkich kierunkach i sumujących się do zera może być słuszna, jeżeli funkcjonuje w ramach koncepcji absolutnej przestrzeni stworzonej przez Newtona. Ale w teorii Einsteina, jeżeli punktem wyjścia miałby być statyczny model Wszechświata, przyciąganie galaktyk powoduje, że Wszechświat zaczyna się zapadać. Jednak Einstein także uważał, że Wszechświat jest statyczny (należy pamiętać, że było to tuż po odkryciu ogólnej teorii względności, w 1915 roku, dziesięć lub nawet więcej lat przed obserwacjami Hubble'a i jego odkryciami dotyczącymi natury galaktyk i ekspansji Wszechświata). Einstein wiedział tylko o gwiazdach w Drodze Mlecznej, których prędkości względem naszego Słońca były małe w porównaniu z prędkością światła. Uważał, że wszystkie gwiazdy są w zasadzie statyczne. Aby rozwiązać ten problem, Einstein zrobił coś bardzo niezwykłego — włączył do swoich równań dodatkowy człon! Jest to tak zwana stała kosmologiczna, której rola polega na tym, że przeciwdziała tendencji Wszechświata do kurczenia się pod wpływem grawitacji.

Dzisiaj powiedzielibyśmy, że — zgodnie z propozycją Einsteina — próżnia ma niewielką, ale dodatnią gęstość energii (w 1934 roku Georges Lemaître pierwszy zwrócił na to uwagę). Jak należy to rozumieć? Gdybyś ze swojego pokoju usunął wszystko — ludzi, krzesła, atomy powietrza wypełniającego pokój, a także wszystkie fotony i inne cząstki — pozostałaby pusta przestrzeń, czyli próżnia. Sądzimy, że gęstość energii próżni jest równa zeru, ale załóżmy, że jest dodatnia. Jeżeli podróżujący z różnymi prędkościami astronauci zmierzą w takiej próżni gęstość energii, to powinni otrzymać taki sam wynik, ponieważ nie istnieje wyróżniony, spoczynkowy układ odniesienia. Ale to oznacza, że próżnia musi także mieć ujemne ciśnienie działające tak samo we wszystkich trzech kierunkach w przestrzeni. Ciśnienie próżni musi mieć ujemny znak (przeciwny do znaku gęstości energii). Przypomnijmy, że w równaniu $\Delta s^2 = -\Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$ człon odpowiadający współrzędnej czasowej ($-\Delta t^2$) ma przeciwny znak do znaków trzech współrzędnych przestrzennych. Równanie dla Δs^2 ma taką samą formę dla każdego poruszającego się astronauty. Nie ma wyróżnionego standardu spoczynku. Na tej samej zasadzie nie ma go w próżni z dodatnią gęstością energii (skojarzoną w teorii Einsteina z wymiarem czasowym) ani z ujemnym ciśnieniem działającym jednakowo wzdłuż osi *x*, *y*, *z*. Gdybyś trochę tej próżni wsadził do pudełka, ujemne ciśnienie zaczęłoby wciągać ściany do środka i pudełko zaczęłoby się zapadać. Gdyby jednak ciśnienie było wszędzie jednorodne, nie zauważyłbyś go. W meteorologii różnica ciśnień generuje aerodynamiczne siły, które z kolei powodują, że wieją wiatry, ale jeżeli ciśnienie jest jednorodne, to go nie dostrzegamy. Ciśnienie w twoim pokoju wynosi około 10 niutonów na centymetr kwadratowy, ale nie czujesz go, ponieważ jest jednorodne i nic nie wieje. Na podobnej zasadzie ciśnienie próżni jest jednorodne w całej przestrzeni, więc nie generuje niezrównoważonych sił powodujących jakieś pływy. Ale oddziałuje grawitacyjnie.

Gęstość energii jest przyciągająca. Powoduje przyciąganie masywnych obiektów. W równaniach Einsteina źródłem grawitacji jest zarówno gęstość energii, jak i ciśnienie. Newton nie wziąłby tego pod uwagę, ale w równaniach

Einsteina za zakrzywienie czasoprzestrzeni odpowiada tensor energii-pędu $T_{\mu\nu}$ (zwany także tensorem napięć-energii), który reprezentuje zarówno gęstość energii, jak i ciśnienie, więc w równaniach Einsteina ciśnienie grawituje. Dodatnie ciśnienie przyciąga, natomiast ciśnienie ujemne jest grawitacyjnie odpychające. Ciśnienie w próżni działa w trzech kierunkach, zatem grawitacyjny efekt (odpychanie) ujemnego ciśnienia jest trzykrotnie większy od grawitacyjnego efektu (przyciągania) gęstości energii. W rezultacie grawitacyjny efekt próżni jest ujemny — próżnia odpycha. Obecnie tę niezerową gęstość energii próżni (wraz z ujemnym ciśnieniem próżni) nazywamy ciemną energią. Jest „ciemna", ponieważ jej nie widzimy; jest „energią", ponieważ próżnia ma energię dodatnią. Jak stwierdził Neil, astronomowie lubią proste nazwy.



ILUSTRACJA 22.4. Diagram czasoprzestrzenny statycznego wszechświata Einsteina. Czas jest na pionowej osi; przyszłość jest ku górze. Przedstawiony jest tylko jeden wymiar przestrzenny (wokół obwodu cylindra) i jeden wymiar czasowy (kierunek pionowy). Proste zielone linie, rozciągające się pionowo wzdłuż cylindra, reprezentują w tym modelu linie świata gwiazd (lub galaktyk) — linie geodezyjne. Obwód cylindra nie zmienia się w czasie — model jest statyczny. Cylinder jest jedynym realnym obiektem na tej ilustracji — ani jego wnętrze, ani zewnętrze nie mają fizycznego znaczenia

Credit: J. Richard Gott, *Time Travel in Einstein's Universe*, Houghton Mifflin, 2001

Gdy w 1917 roku Einstein stworzył swój kosmologiczny model, zakładał, że gwiazdy są jednorodnie rozłożone w przestrzeni. Gwiazdy się przyciągają, więc skompensował ich przyciąganie grawitacyjnym odpychaniem swojej stałej kosmologicznej. Dzięki temu mógł stworzyć statyczny model o określonej geometrii. Diagram czasoprzestrzenny statycznego wszechświata Einsteina wygląda jak powierzchnia cylindra (il. 22.4).

Na diagramie przedstawiony jest tylko jeden wymiar przestrzenny oraz jeden wymiar czasowy. Pozostałe dwa wymiary przestrzenne pomijamy, aby umożliwić wizualizację. Czas jest pionową współrzędną, cylinder jest pionowy i w każdym momencie ma przekrój kołowy. Okrąg reprezentuje jedną współrzędną przestrzenną. Okrąg to jest brzeg koła, czyli Kołobrzeg. Mieszkanka Linelandii może mieszkać na nieskończonej linii, ale równie dobrze może mieszkać na okręgu — na Kołobrzegu. A skąd wie, że mieszka na Kołobrzegu? No cóż, gdy przejdzie odległość $2\pi r$ w jednym kierunku, znajdzie się w tym samym miejscu, z którego wyruszyła. To jest zamknięty model kosmologiczny, w którym wszechświat domyka się sam na sobie, tworząc okrąg. Proste zielone linie, rozciągające się pionowo wzdłuż cylindra, reprezentują linie świata gwiazd (lub galaktyk). Są to linie geodezyjne, proste jak drut. Model ciężarówki mógłby jechać do góry wzdłuż cylindra, bez skręcania kierownicy. Linie świata galaktyk są równoległe. Wraz z upływem czasu galaktyki nie oddalają się ani nie zbliżają do siebie. Obwód wszechświata nie zmienia się w czasie. To jest Kołobrzeg, gdzie promień okręgu nie zmienia się w czasie. Wszystkie te cechy dowodzą, że jest to statyczny model. Grawitacyjne przyciąganie galaktyk jest dokładnie zrównoważone przez grawitacyjnie odpychające efekty stałej kosmologicznej (którą obecnie będziemy nazywać ciemną energią).

Omówimy teraz dwie dodatkowe współrzędne sferyczne, które pominęliśmy na diagramie. Geometria tego wszechświata nie jest w istocie okręgiem ani sferą, lecz tak zwaną 3-sferą. Co to jest 3-sfera? Okrąg to jest jednowymiarowy zbiór punktów jednakowo odległych (o r) od środkowego punktu na dwuwymiarowej płaszczyźnie euklidesowej. Sfera to dwuwymiarowy zbiór punktów jednakowo odległych (o r) od środkowego punktu w trójwymiarowej przestrzeni euklidesowej. Sfera jest dwuwymiarową powierzchnią. Płaszczak mógłby mieszkać na powierzchni sfery. Odkryłby, że jest mieszkańcem Sferolandii, gdyby szedł prosto przed siebie i po przejściu odległości $2\pi r$ w jednym kierunku znalazłby się w tym samym miejscu, z którego wyruszył. Mógłby także narysować trójkąt z trzema kątami prostymi, łącząc północny biegun sfery z dwoma punktami odległymi o 90° na równiku (jak na il. 19.1). To nie jest geometria euklidesowa. Każde przecięcie sfery jest okręgiem (co ciekawe, Mark Alpert i ja udowodniliśmy, że gdyby Einstein mieszkał we Flatlandii, gdzie punktowe masy nie przyciągają się grawitacyjnie, mógłby wymyślić statyczny wszechświat w Sferolandii bez konieczności wprowadzania stałej kosmologicznej. Ale Einstein nie mieszkał we Flatlandii, więc musiał użyć sfery z większą o jeden liczbą wymiarów!). Okrąg jest hipersferą jednowymiarową (1-sferą), sfera jest hipersferą dwuwymiarową (2-sferą), a 3-sfera jest hipersferą z większą o jeden liczbą

wymiarów niż zwykła sfera. 3-sfera jest zbiorem punktów jednakowo odległych (o r) od środkowego punktu w czterowymiarowej przestrzeni euklidesowej. Odległość między punktami w tej czterowymiarowej przestrzeni euklidesowej określa interwał $\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 + \Delta w^2$ (nie ma tu wymiaru czasowego). Dodaliśmy człon odpowiadający dodatkowemu wymiarowi przestrzennemu w. 3-sfera jest zbiorem punktów, dla których $r^2 = x^2 + y^2 + z^2 + w^2$.

Okrąg jest zakrzywioną, jednowymiarową, zamkniętą linią; sfera jest zakrzywioną, dwuwymiarową, zamkniętą powierzchnią; 3-sfera jest zakrzywioną, trójwymiarową, zamkniętą objętością. Okrąg ma obwód o skończonej długości ($2\pi r$), sfera ma skończone pole powierzchni ($4\pi r^2$), a 3-sfera ma skończoną objętość ($2\pi^2 r^3$). Gdybyś mieszkał we wszechświecie, który jest 3-sferą, i wyruszyłbyś w podróż, kierując się na północ i cały czas poruszając się prosto, powróciłbyś do miejsca startu po pokonaniu odległości $2\pi r$; wróciłbyś do domu od południa po okrążeniu całego wszechświata. Jeżeli wyruszysz na wschód i będziesz leciał cały czas prosto, powrócisz na macierzystą planetę z zachodu, po pokonaniu odległości $2\pi r$ i po okrążeniu całego wszechświata. Jeżeli wyruszysz z domu prosto w górę, powrócisz na macierzystą planetę od dołu, po pokonaniu odległości $2\pi r$. To trójwymiarowy świat, który — podobnie jak nasz — ma trzy pary kierunków: północ–południe, wschód–zachód i góra–dół, ale niezależnie od kierunku, w którym wyruszysz, powrócisz na miejsce startu. Nieustraszona podróżniczka we wszechświecie Einsteinowskiej 3-sfery może badać odległe galaktyki, ale będzie miała pewność, że powróci do swej macierzystej galaktyki, jeżeli będzie się poruszać wzdłuż linii geodezyjnej w ustalonym kierunku. Zawsze powróci do domu, jak bumerang. Jej świat jest ograniczony, lecz nie ma krawędzi, nie ma granic, które mogłyby ją zatrzymać.

Wszechświat 3-sfery jest zamknięty, ma skończoną objętość i skończoną liczbę galaktyk. Jeżeli na przykład średnia odległość galaktyk wynosi 24 miliony lat świetlnych, to średnia objętość przypadająca na jedną galaktykę wynosi $(24 \text{ miliony lat świetlnych})^3$. Jeżeli promień krzywizny statycznego wszechświata 3-sfery wynosi 2400 milionów lat świetlnych, to objętość tego wszechświata wynosi $2(\pi)^2 (24 \text{ miliony lat świetlnych})^3$. Dzieląc objętość wszechświata przez objętość jednej galaktyki, $2(\pi)^2 (2400 \text{ milionów lat świetlnych})^3 / (24 \text{ miliony lat świetlnych})^3$, dostajemy $2(\pi)^2 \times (100)^3$, czyli $2(\pi)^2 \times$ milion. To oznacza, że ten wszechświat zawiera około 20 milionów galaktyk. Gdybyś mieszkał w statycznym wszechświecie Einsteina, odkryłbyś, że galaktyki się nie oddalają i że istnieje skończona liczba galaktyk. Astronomowie mieszkający w takim wszechświecie mogliby zidentyfikować i policzyć wszystkie galaktyki.

We wszechświecie 3-sfery nie istnieje wyróżniony obserwator; położenie dowolnej galaktyki nie jest w żaden sposób wyróżnione, podobnie jak położenie dowolnego punktu na powierzchni sfery nie jest w żaden sposób wyróżnione. Każdy mieszkaniec Ziemi może myśleć o sobie, że jest na środku, w tym sensie, że siedzi na szczycie sfery. Każdemu z nas może się wydawać, że stoi na szczycie świata. Stoi prosto na kuli, więc wszyscy inni muszą zwisać po

bokach! Mieszkańcy Australii muszą zwisać w dół! Ale każdy może tak myśleć. W Pekinie jest okrągła platforma, która miała reprezentować środek świata. W Anglii „południk zero", definiujący 0^0 długości geograficznej, przechodził przez środek przedmieścia Londynu, Greenwich, gdzie mieściło się obserwatorium. Każdy z nas może myśleć, że jest na środku, ponieważ wszystkie punkty są równoważne. Co więcej, gdybyś mieszkał we wszechświecie 3-sfery i policzyłbyś galaktyki, znalazłbyś jednakową liczbę galaktyk w każdym kierunku. Rozkład galaktyk byłby izotropowy, czyli niezależny od kierunku, dokładnie tak, jak zaobserwował Hubble.

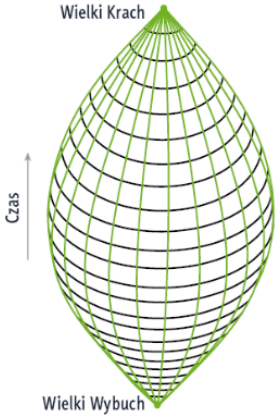
Einstein opublikował swoją statyczną kosmologię w 1917 roku. Stała kosmologiczna, którą dodał do swoich równań, spowodowała dodatkowe zakrzywienie pustej przestrzeni, ale na tyle małe, że nie wpłynęło ono na testy ogólnej teorii względności, które Einstein wykonał w ramach Układu Słonecznego. Co więcej, dodanie tej stałej nie zmieniło faktu, że równania spełniały lokalną zasadę zachowania energii! Einstein był prawdopodobnie jedyną osobą, która była wówczas w stanie wymyślić taką poprawkę do równań, aby wygenerować statyczny wszechświat.

W międzyczasie, w 1922 roku, w Rosji Alexander Friedmann znalazł kosmologiczne rozwiązanie pierwotnych (czyli bez stałej kosmologicznej) równań Einsteina. W rozwiązaniu Friedmanna wszechświat zawiera zwykłe gwiazdy (lub galaktyki). Problem był trudniejszy, ponieważ rozwiązanie jest dynamiczne (niestatyczne). W geometrii rozwiązania Friedmanna wszechświat jest 3-sferą, podobnie jak w rozwiązaniu Einsteina, lecz jego promień może się zmieniać w czasie. Friedmann odkrył rozwiązanie (zob. il. 22.5), którego diagram czasoprzestrzenny wygląda jak piłka do futbolu amerykańskiego (ustawiona i gotowa do wykopu).

Czas biegnie pionowo na tym diagramie, a przyszłość jest ku górze. Przedstawiony jest tylko jeden wymiar przestrzenny i jeden wymiar czasowy. Współrzędną przestrzenną reprezentuje kołowy przekrój (Kołobrzeg), którego promień zmienia się w czasie. Wszechświat 3-sfery startuje z zerowym promieniem w Wielkim Wybuchu (u dołu diagramu). Z upływem czasu rozszerza się, aż osiągnie maksymalny obwód w środku diagramu, po czym zaczyna się kurczyć i ostatecznie zapada się do zerowego promienia w Wielkim Krachu[7] u góry diagramu. Zielone linie geodezyjne, biegnące wzdłuż szwów piłki futbolowej, od Wielkiego Wybuchu do Wielkiego Krachu, reprezentują linie świata galaktyk. Linie geodezyjne są tak proste, jak tylko jest to możliwe w zakrzywionej czasoprzestrzeni. Możesz przejechać wzdłuż każdej z nich modelem ciężarówki, cały czas trzymając przednie koła ustawione na wprost. Ten diagram jest doskonałą ilustracją, jak pracują równania Einsteina. Masa galaktyk powoduje zakrzywienie czasoprzestrzeni, a zakrzywienie czasoprzestrzeni sprawia, że linie świata galaktyk — szwy — są wygięte. Biegnące od dołu szwy rozchodzą się, lecz krzywizna powierzchni piłki futbolowej ściąga je z powrotem w Wielkim Krachu. Na początku, w Wielkim Wybuchu, wszystkie galaktyki oddalają się, lecz grawitacyjne przyciąganie (krzywizna czasoprzestrzeni) spowalnia ich ekspansję do chwilowego zatrzymania w środku, na równiku piłki, a w górnej części piłki

grawitacja powoduje, że galaktyki zaczynają się zbliżać. Odległości galaktyk zaczynają się zmniejszać, gdy obwód wszechświata zaczyna się kurczyć, aż w końcu wszystkie zderzają się w Wielkim Krachu. Nie chciałbyś tam być, gdy to się zdarzy! Gdy objętość wszechświata zmniejsza się do zera, zostaniesz zmiażdżony. Natrafisz na osobliwość Wielkiego Krachu, gdzie zakrzywienie staje się nieskończone, podobnie jak w osobliwości czarnej dziury.

Należy podkreślić, że jedynym realnym obiektem jest powierzchnia piłki. Ani wnętrze, ani zewnętrze piłki nie mają fizycznego znaczenia. Ilustracja przedstawia piłkę w wielowymiarowej przestrzeni wyłącznie dlatego, aby możliwa była wizualizacja jej kształtu.



ILUSTRACJA 22.5. Diagram czasoprzestrzenny wszechświata Friedmanna. Na tym diagramie, podobnie jak na ilustracji 22.4, przedstawiony jest tylko jeden wymiar przestrzenny (obwód piłki futbolowej) i jeden wymiar czasowy (kierunek pionowy). Zielone linie, biegnące wzdłuż szwów piłki, reprezentują linie świata galaktyk. Są to linie geodezyjne — najprostsze linie, jakie da się narysować na powierzchni piłki. Masy galaktyk są przyczyną zakrzywionego kształtu, a linie świata biegną wzdłuż linii geodezyjnych na zakrzywionej powierzchni. Wszechświat jest dynamiczny, z Wielkim Wybuchem na początku. Początkowo galaktyki się oddalają, gdy obwód wszechświata rośnie z czasem. To jest rozszerzający się wszechświat, ale w końcu grawitacyjne przyciąganie galaktyk spowoduje, że wszechświat zacznie się kurczyć i ostatecznie zapadnie się w Wielkim Krachu. Jedynym realnym obiektem na tej ilustracji jest powierzchnia piłki — ani jej wnętrze, ani zewnętrze nie mają fizycznego znaczenia

Credit: J. Richard Gott, *Time Travel in Einstein's Universe*, Houghton Mifflin, 2001

Czas zaczyna się w Wielkim Wybuchu, w osobliwości o nieskończonej krzywiźnie. Wielki Wybuch zaczęliśmy omawiać w rozdziale 14. Co było przed Wielkim Wybuchem? W kontekście ogólnej teorii względności to pytanie nie ma sensu, ponieważ i czas, i przestrzeń zostały stworzone w Wielkim Wybuchu. Równie dobrze można by zapytać, co jest na południe od bieguna południowego. Jeżeli będziesz podążał coraz dalej na południe, to w końcu dotrzesz do bieguna południowego, ale nie możesz dotrzeć dalej na południe niż do bieguna południowego. Na tej samej zasadzie, jeżeli będziesz podążał coraz dalej wstecz w czasie, to w końcu dotrzesz do Wielkiego Wybuchu, ale nie możesz dotrzeć dalej wstecz w czasie niż do Wielkiego Wybuchu. To wtedy została stworzona przestrzeń i czas, więc to jest najwcześniejszy moment, do którego możesz się cofnąć. Arystoteles wolał wszechświat, który istniał od zawsze, ponieważ nie musiał zadawać pytania o początek; jeżeli świat miał początek, pierwszą przyczynę, to musiałby wyjaśnić, co było przyczyną

pierwszej przyczyny. Newton i Einstein także woleli wszechświat, który istniał od zawsze, natomiast wszechświat Friedmanna zaczął się w Wielkim Wybuchu w skończonym czasie w przeszłości, gdy zarówno przestrzeń, jak i czas zostały stworzone.

Friedmann opublikował swoje rozwiązanie w 1922 roku, ale początkowo niemal nikt nie zwrócił na nie uwagi. Einstein uważał, że stanowi matematycznie interesujące rozwiązanie jego równań polowych, ale twierdził, że rzeczywisty Wszechświat opisuje jego własny, statyczny model. Jak widzieliśmy w rozdziale 14, w 1929 roku Hubble odkrył ekspansję Wszechświata. Model Friedmanna przewidywał, że Wszechświat powinien albo się rozszerzać, albo kurczyć. Hubble odkrył, że linie świata galaktyk rzeczywiście się rozbiegają. Gdzie w takim razie bylibyśmy w modelu Friedmanna? Znaleźlibyśmy się w dolnej części piłki futbolowej, w fazie ekspansji, gdy linie świata się rozbiegają. W 1931 roku Hubble i Humason odkryli dalsze galaktyki, oddalające się od nas z prędkością do 20 000 km/s, co potwierdziło wniosek, że Wszechświat się rozszerza.

Gdy w 1931 roku Einstein dowiedział się o wynikach Hubble'a, powiedział George'owi Gamowowi, że wprowadzenie stałej kosmologicznej do równań było największą pomyłką jego życia. Dlaczego? Nikt nie zwrócił uwagi na artykuł Friedmanna. Ale gdyby Einstein nie wymyślił stałej kosmologicznej, musiałby porzucić model statyczny. Wtedy mógłby sam odkryć model Friedmanna. A gdyby to Einstein opublikował ten sam model, który opublikował Friedmann, cały świat zwróciłby uwagę. Einstein mógłby z góry przewidzieć, że Wszechświat nie może być statyczny, lecz musi albo się rozszerzać, albo kurczyć. I wtedy, gdy Hubble odkrył ekspansję Wszechświata, byłoby to wspaniałe potwierdzenie Einsteinowskiej ogólnej teorii względności. Byłby to największy triumf Einsteina. Zwróć uwagę, że wcześniej nikt nie wspominał o czymś takim, jak rozszerzanie Wszechświata. Padłoby pytanie: rozszerzanie do czego? Ale w teorii Einsteina rozszerzałaby się sama zakrzywiona przestrzeń. Nie rozszerzałaby się do czegoś (ani na zewnątrz, ani do wewnątrz piłki futbolowej — rozszerzałaby się sama piłka), po prostu by się rozciągała. To tylko przestrzeń łącząca wszystkie galaktyki się powiększa. Niesamowite. Doceniając to wszystko, Einstein zadeklarował, że stała kosmologiczna była największą pomyłką jego życia. W rozdziale 23 zwrócimy uwagę, że dzisiaj, czyli niemal sto lat później, Einstein mógłby zrewidować tę opinię.

Rozwiązanie Friedmanna nie jest jedynym modelem Wszechświata, w którym występuje wyłącznie zwykła materia (czyli modelem bez ujemnego ciśnienia, ciemnej energii itp.). Jak skonstruować najbardziej ogólny model tego typu? Z naszego punktu widzenia Wszechświat jest izotropowy (taki sam we wszystkich kierunkach). Jak wspomniał Michael w rozdziale 14, ktoś mógłby na tej podstawie pomyśleć, że jesteśmy w samym centrum wielkiej eksplozji. Gdybyś się przemieścił w jedną stronę od centrum, mógłbyś oczekiwać więcej galaktyk w kierunku centrum niż w przeciwnym kierunku. Jeżeli natomiast byłbyś w samym centrum, oczekiwałbyś tyle samo galaktyk w dowolnym kierunku. Ale od czasów Kopernika nie wierzymy w takie rzeczy.

Nie jesteśmy jedną, szczególną galaktyką w centrum, a wszystkie inne są poza centrum. Jeżeli zastosujemy zasadę kopernikańską, zgodnie z którą nasze położenie we Wszechświecie raczej nie jest wyróżnione, to Wszechświat musi być izotropowy z punktu widzenia dowolnego obserwatora w dowolnej, nawet bardzo odległej galaktyce (w przeciwnym razie ten obserwator byłby wyróżniony). Jeżeli wszyscy obserwatorzy widzą Wszechświat, który jest jednakowy we wszystkich kierunkach, to Wszechświat musi być jednorodny.

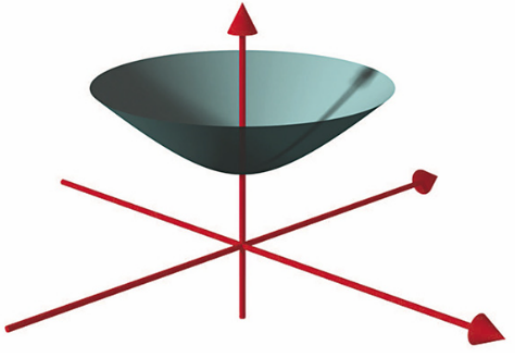
Gdyby gęstość galaktyk w pewnym obszarze była większa niż w obszarze sąsiednim, to obserwator położony między nimi widziałby więcej galaktyk w jednym kierunku, a mniej w przeciwnym. Rezultat jego obserwacji nie byłby izotropowy. W małych skalach widzimy oczywiście gromady galaktyk, lecz w dużych skalach widzimy jednakową liczbę galaktyk w różnych kierunkach. Oznacza to, że tylko w dużych skalach Wszechświat musi być izotropowy i jednorodny. Jedyne izotropowe i jednorodne modele w ogólnej teorii względności to takie, które cechuje jednorodna krzywizna. Gdyby w danej epoce krzywizna była większa w jednym obszarze, a mniejsza w drugim, Wszechświat nie wyglądałby tak samo w dowolnym kierunku z punktu widzenia dowolnego obserwatora. W izotropowym modelu krzywizna jest jednakowa w dowolnym kierunku. Krzywizna musi być jednakowa w każdym kierunku i musi mieć stałą wartość. Jednym z takich rozwiązań jest 3-sfera Friedmanna, która ma jednorodną, dodatnią krzywiznę. Krzywizna jest dodatnia, podobnie jak krzywizna 2-sfery. Wszechświat 3-sfery, podobnie jak 2-sfera, nie ma wyróżnionych punktów ani wyróżnionych kierunków.

Carl Friedrich Gauss zdefiniował krzywiznę dwuwymiarowej powierzchni jako $1/r_1 r_2$, gdzie r_1 i r_2 są głównymi promieniami krzywizny. Krzywizna Gaussa dla sfery wynosi $1/{r_0}^2$, gdzie r_0 jest promieniem sfery. Dla sfery oba promienie krzywizny mają taki sam znak — jeżeli siedzisz na wierzchołku sfery, linia geodezyjna idąca od lewej do prawej wygina się po obu stronach ku dołowi, i podobnie ku dołowi wygina się linia geodezyjna idąca od przodu do tyłu. Dwa ujemne promienie (ugięcie ku dołowi w obu kierunkach) pomnożone przez siebie, dają dodatni wynik, więc iloczyn $r_1 r_2$ jest dodatni, a także krzywizna Gaussa, $1/r_1 r_2$, jest dodatnia. Zatem krzywizna sferycznej powierzchni jest zawsze dodatnia.

Są jednak dwie dodatkowe możliwości — zerowa krzywizna lub ujemna krzywizna. Po pierwsze, wszechświat może mieć w danej epoce zerową krzywiznę, czyli może być płaski jak nieskończona płaszczyzna (gdy w odniesieniu do takiego wszechświata używamy określenia „płaski", mamy na myśli „niezakrzywiony", a nie „dwuwymiarowy", jak Flatlandia. Chodzi o nieskończony, trójwymiarowy wszechświat spełniający prawa stereometrii — trójwymiarowej geometrii euklidesowej). Ten wszechświat jest nieskończony i ma nieskończoną liczbę galaktyk (i nie ma środka, jak wspomnieliśmy w rozdziale 14).

W trzecim przypadku krzywizna jest ujemna. Geometria w danej epoce ma ujemną krzywiznę jak nieskończenie duże końskie siodło. Końskie siodło zakrzywia się ku dołowi po lewej i po prawej stronie, tam gdzie jeździec trzyma nogi, natomiast do przodu i do tyłu siodło zakrzywia się ku górze,

dopasowując się do kształtu szyi i zadu konia. Zatem znaki krzywizny w dwu kierunkach są przeciwne. A skoro plus razy minus daje minus, to krzywizna $1/r_1 r_2$ jest ujemna. Jeżeli narysujesz okrąg na końskim siodle, to jego obwód będzie większy niż $2\pi r$, w przeciwieństwie do sfery, gdzie — jak już wspomnieliśmy — obwód jest mniejszy niż $2\pi r$. Jeżeli na końskim siodle zatoczysz koło o promieniu r, to będziesz się poruszał w górę i w dół, więc obwód okaże się dłuższy niż spodziewałbyś się na płaszczyźnie.



ILUSTRACJA 22.6. Ujemnie zakrzywiona hiperboliczna przestrzeń (niebieska) w zwykłej czasoprzestrzeni. Czas jest pionową współrzędną z przyszłością ku górze. Pokazujemy także dwie współrzędne przestrzenne jako poziome strzałki

Credit: Lars H. Rohwedder

Ujemnie zakrzywiona powierzchnia tworzy wszechświat, który także ma nieskończoną liczbę galaktyk. Jest to wszechświat hiperboliczny, przedstawiony na ilustracji 22.6 jako powierzchnia w kształcie miski, umieszczona w zwykłej, płaskiej czasoprzestrzeni szczególnej teorii względności. Czas na ilustracji jest pionową współrzędną, z przyszłością ku górze. Pokazujemy także dwie współrzędne przestrzenne, oznaczone poziomymi, czerwonymi strzałkami.

Gdybyś zmierzył taśmą odległość od środka na dnie miski do krawędzi u góry miski, przekonałbyś się, że długość promienia wytyczonego wzdłuż powierzchni jest dziwnie krótka w porównaniu z obwodem. Jest tak dlatego, że przyłożona do powierzchni miski taśma nie tylko przemieszcza się w przestrzeni, ale także w czasie. Zmierzona odległość okaże się mniejsza ze względu na czynnik Δt^2, który zmniejsza wartość Δs^2 w trakcie pomiaru taśmą mierniczą. Jeżeli promień okręgu jest krótki w stosunku do obwodu, to znaczy, że obwód jest duży w stosunku do promienia, a to jest znak firmowy ujemnej krzywizny (końskie siodło stanowi analogię, która ilustruje dużą wartość stosunku obwodu do promienia, ale ma wyróżnione kierunki — przód–tył, lewo–prawo — których nie ma wszechświat hiperboliczny; wszechświat hiperboliczny jest taki sam we wszystkich kierunkach). Ta hiperboliczna powierzchnia rozciąga się do nieskończoności, ma nieskończoną objętość i zawiera nieskończoną liczbę galaktyk. Friedmann badał ten typ modelu w 1924 roku i odkrył, że model zaczął się w Wielkim Wybuchu i zawsze się rozszerzał. Później Howard Robertson badał przypadek płaski, czyli z zerową krzywizną, i odkrył, że ten model także zaczął się w Wielkim Wybuchu i zawsze się rozszerzał.

Podsumujmy te wyniki (tab. 22.1). W dodatnio zakrzywionym wszechświecie suma kątów trójkąta narysowanego w określonej epoce jest większa od 180°, podobnie jak na sferze. W płaskim wszechświecie o zerowej krzywiźnie suma kątów trójkąta narysowanego w określonej epoce jest równa 180°. W ujemnie zakrzywionym wszechświecie suma kątów trójkąta w określonej epoce jest mniejsza od 180°. Dodatnio zakrzywiony wszechświat Friedmanna jest skończony w przestrzeni i skończony w czasie. Ten wszechświat domyka się sam na sobie w przestrzeni, tworząc zamkniętą powierzchnię, i także zamyka się w czasie, z Wielkim Krachem na końcu. Płaski wszechświat Friedmanna (a także identycznie ujemnie zakrzywiony wszechświat Friedmanna) jest nieskończony w przestrzeni, zawiera nieskończoną liczbę galaktyk, i jest także nieskończony w czasie, rozszerzając się nieskończenie w przyszłość.

TABELA 22.1. Charakterystyki Friedmannowskich modeli wielkiego wybuchu

Model	**3-sfera**	**Płaski**	**Hiperboliczny**
Krzywizna	dodatnia	zero	ujemna
Obwód okręgu	$< 2\pi r$	$= 2\pi r$	$> 2\pi r$
Suma kątów trójkąta	$> 180°$	$= 180°$	$< 180°$
Liczba galaktyk	skończona	nieskończona	nieskończona
Początek	Wielki Wybuch	Wielki Wybuch	Wielki Wybuch
Przyszłość	skończona	nieskończona	nieskończona
Historia ekspansji	najpierw ekspansja, potem kolaps, na koniec Wielki Krach	wieczna ekspansja	wieczna ekspansja

Po odkryciu mikrofalowego promieniowania tła przez Penziasa i Wilsona w 1965 roku zaczęły się poszukiwania i badania, który z powyższych modeli najlepiej opisuje nasz Wszechświat. Obecnie dostępne dane z satelitów WMAP i Planck faworyzują model z zerową krzywizną, z dokładnością lepszą niż 1%, ale odkryliśmy, że dynamika Wszechświata jest bardziej skomplikowana niż wyobrażał sobie Friedmann. Po odkryciach Hubble'a potwierdzających przewidziane przez modele Friedmanna rozszerzanie Wszechświata pozostało kilka zagadek. Czy rzeczywiście niczego nie było przed Wielkim Wybuchem? Co zapoczątkowało Wielki Wybuch? Dlaczego obserwujemy tak jednorodne mikrofalowe promieniowanie tła? Aby odpowiedzieć na te pytania, będziemy musieli przeegzaminować bardzo wczesną historię Wszechświata.

23 – Inflacja i ostatnie odkrycia kosmologii

J. Richard Gott

W tym rozdziale zajmiemy się bardzo wczesnym Wszechświatem, cofając się w czasie aż do Wielkiego Wybuchu, a nawet wcześniej. Jak już wspomnieliśmy, w 1948 roku George Gamow zastanawiał się, jak Wszechświat mógł wyglądać w swoich najwcześniejszych momentach. Gamow uważał, że Wszechświat był wtedy ściśnięty, bardzo gorący i wypełniony przez gorące promieniowanie termiczne. W miarę rozszerzania się Wszechświata to promieniowanie się ochładza.

Możemy to wyjaśnić na przykładzie wszechświata 3-sfery Friedmanna. W każdej epoce 3-sfera Friedmanna ma skończony obwód, a w miarę rozszerzania się wszechświata 3-sfery jego obwód się powiększa. Wyobraź sobie fotony krążące po tym obwodzie, jak samochody ścigające się wzdłuż kołowego toru. Obwód toru powiększa się z czasem, a samochody nieustannie krążą jeden za drugim wokół toru. Załóżmy, że dwanaście fotonów krąży wokół kołowego toru, i że są jednorodnie rozłożone na torze, jak cyfry na tarczy zegara. W miarę jak tor się rozszerza, samochody wciąż krążą z taką samą prędkością, prędkością światła. Jeżeli wystartowały w jednakowych odległościach, czyli 1/12 długości toru oddziela każdy samochód od poprzednika, to pozostaną w jednakowych odległościach na rozszerzającym się torze. Każdy samochód jedzie z taką samą prędkością, więc żaden z nich ani nie dogania poprzednika, ani nie pozwala się dogonić następnemu. Skoro samochody pozostają w jednakowych odległościach, a tor się rozszerza, to odległość dwóch sąsiednich samochodów musi się powiększać. Jeżeli rozmiar toru wzrośnie dwukrotnie, to odległość samochodów wzrośnie dwukrotnie. A teraz wyobraź sobie falę elektromagnetyczną krążącą po obwodzie zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara. Każdy z dwunastu fotonów może być umieszczony na jednym z grzbietów fali. Zarówno fotony, jak i grzbiety fal poruszają się z prędkością światła, więc fotony pozostają w trakcie ruchu na grzbietach fali. A zatem w miarę rozszerzania obwodu odległość grzbietów wzrasta w takim samym stopniu. Jeżeli obwód wszechświata wzrośnie dwukrotnie, to długość fali (odległość sąsiednich grzbietów) również wzrośnie dwukrotnie.

To wyjaśnia, dlaczego światło ulega przesunięciu ku czerwieni, gdy Wszechświat się rozszerza — ponieważ przestrzeń się rozciąga. Przesunięcie ku czerwieni oznacza, że gorące promieniowanie termiczne z wczesnego Wszechświata będzie się ochładzać (długość fali będzie rosnąć) w miarę rozszerzania Wszechświata. Analiza reakcji jądrowych zachodzących w czasie pierwszych trzech minut i porównanie z obserwowanym dzisiaj rozpowszechnieniem deuteru umożliwiły studentom Gamowa, Robertowi Hermanowi i Ralphowi Alpherowi, obliczenie temperatury, jaką to promieniowanie miałoby dzisiaj — przez oszacowanie, jak bardzo Wszechświat się rozszerzył od tego czasu. Z ich obliczeń wynikała temperatura 5 K. Jak widzieliśmy w rozdziale 15, w latach sześćdziesiątych Robert Dicke z Princeton przeprowadził podobne rozumowanie, doszedł do podobnych wniosków i zamierzał wykryć promieniowanie. Ubiegli go Penzias i Wilson.

Gdy satelita Cosmic Background Explorer (COBE) został wystrzelony w 1989 roku, aby dokładnie zmierzyć mikrofalowe promieniowanie tła (CMB), zarejestrował niemal idealne widmo ciała doskonale czarnego (tak jak przewidywał Gamow) o temperaturze 2,725 K. George Smoot i John Mather otrzymali w 2006 roku nagrodę Nobla za odkrycia dokonane przez COBE.

Gamow i Alpher przewidzieli istnienie CMB, a Alpher i Herman oszacowali jego temperaturę na 5 K. Były to jedne z najbardziej godnych uwagi przewidywań w historii nauki, które zostały następnie potwierdzone; tak zdumiewające, jakby przewidzieli, że na trawniku Białego Domu wyląduje latający spodek o średnicy 50 stóp, a następnie spodek o średnicy 27 stóp faktycznie wylądował! Było to także ważne potwierdzenie zasady kopernikańskiej, zgodnie z którą nasze położenie we Wszechświecie nie jest w żaden sposób wyróżnione. Wraz z obserwacjami Hubble'a potwierdzającymi izotropię zasada kopernikańska prowadzi nas wprost do jednorodnego, izotropowego, Friedmannowskiego rozwiązania Einsteinowskich równań pola. Z modelu Friedmanna wynika z kolei Wielki Wybuch. Na tej podstawie Gamow i jego koledzy przewidzieli mikrofalowe promieniowanie tła.

Model Wielkiego Wybuchu Friedmanna okazał się niesamowicie skuteczny, lecz pozostało do rozważenia kilka istotnych kwestii. Ten wszechświat ma początek, Wielki Wybuch, ale co się działo przed Wielkim Wybuchem? Standardowa odpowiedź (którą podaliśmy w rozdziale 22) brzmi, że zarówno czas, jak i przestrzeń zostały stworzone w Wielkim Wybuchu, więc nie było czasu przed Wielkim Wybuchem. Ale nadal pozostaje pytanie: dlaczego Wielki Wybuch był tak jednorodny? Gdy patrzymy w różnych kierunkach, temperatura CMB jest jednorodna z dokładnością do 1/100 000. Skąd, w jaki sposób te różne obszary „wiedzą", jaką mają temperaturę? Gdy patrzymy w jednym kierunku, patrzymy przez 13,8 miliarda lat świetlnych przestrzeni i wracamy w czasie do epoki, gdy Wszechświat miał zaledwie 380 tysięcy lat. W standardowym modelu Wielkiego Wybuchu, wpływ na ten obszar mogły mieć zdarzenia odległe nie więcej niż o 380 tysięcy lat świetlnych. Ale gdy spojrzymy w przeciwnym kierunku, pod kątem 180° na niebie, także patrzymy przez 13,8 miliarda lat świetlnych przestrzeni, ale widzimy inny obszar, który ma w zasadzie taką samą temperaturę. W standardowym modelu Wielkiego Wybuchu te dwa obszary po przeciwnych stronach nieba, w epoce 380 tysięcy lat po Wielkim Wybuchu (czyli takie, jak je teraz widzimy), były oddalone o 86 milionów lat świetlnych i nie miały czasu, aby się komunikować w krótkim okresie 380 tysięcy lat od narodzin. Zazwyczaj, gdy widzimy dwa obszary o jednakowej temperaturze, oznacza to, że miały czas, aby się komunikować i osiągnąć równowagę termiczną. Ale w standardowym modelu Wielkiego Wybuchu obszary CMB znacznie oddalone na niebie nie miały czasu, aby wejść w kontakt przyczynowy. W modelu Friedmanna różne obszary Wszechświata musiały jakimś cudem wystartować z jednorodną ekspansją wszędzie w takiej samej temperaturze. Jak to możliwe, aby była tak jednorodna?

Satelita COBE zarejestrował także niewielkie fluktuacje, rzędu 1/100 000, w różnych obszarach nieba. Gdyby Wszechświat był doskonale jednorodny, nie

pojawiłyby się żadne różnice gęstości, z których później powstały galaktyki i gromady galaktyk. Nasze istnienie zależy od małych, początkowych fluktuacji, które pod wpływem grawitacji stopniowo rosły i przekształciły się w obserwowane dzisiaj galaktyki. Wszechświat musiał być niemal doskonale jednorodny, ale jednak nie do końca. To była zagadka. Przypomina się powiedzenie z czasów wielkiego kryzysu: „gdybyśmy mieli trochę boczku, moglibyśmy zjeść na śniadanie jajecznicę na boczku, gdybyśmy mieli parę jajek!". Najpierw musieliśmy wyjaśnić ogólną jednorodność, a potem małe fluktuacje.



ILUSTRACJA 23.1. Inflacyjny początek (trąbka) czasoprzestrzeni Wielkiego Wybuchu we wszechświecie Friedmanna (piłka futbolowa)

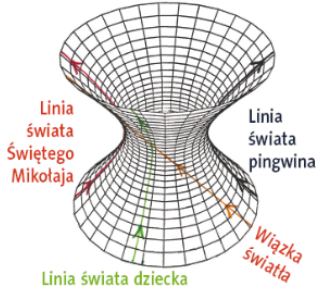
Credit: J. Richard Gott, *Time Travel in Einstein's Universe*, Houghton Mifflin, 2001

W 1981 roku Alan Guth zaproponował rozwiązanie tego problemu. W jego modelu Wszechświat zaczął od krótkiego okresu przyspieszonej ekspansji, którą nazwał inflacją. Na diagramie czasoprzestrzennym inflacja wygląda jak mała trąbka ustawiona do góry niczym podstawka do gry w golfa, podtrzymująca futbolową piłkę czasoprzestrzeni Friedmanna. U dołu diagramu, w pobliżu ustnika, trąbka ma mały obwód, lecz zaczyna się powiększać, gdy czas płynie ku górze diagramu, aż po szeroki otwór w kształcie dzwonu. Dolny koniec Friedmannowskiej piłki futbolowej został zastąpiony przez mały ustnik trąbki o skończonym obwodzie, zapewne nie większy niż 3×10^{-27} centymetra (il. 23.1). Epoka trąbki trwała nieco dłużej niż sam koniec piłki; ten dodatkowy czas umożliwił różnym obszarom — które dzisiaj obserwujemy — wejść w kontakt przyczynowy. Na początku obwód jest tak mały, że różne obszary, korzystając z tego dodatkowego czasu, weszły w kontakt przyczynowy, a dopiero potem rozdzieliła je przyspieszona ekspansja w epoce trąbki; tylko pozornie wydaje się, że nie miały dość czasu, aby się komunikować.

Jakie przesłanki miał Guth, gdy formułował ten model? Uważał, że we wczesnym Wszechświecie mógł istnieć stan próżni o wysokiej gęstości energii — a zatem o wysokim ujemnym ciśnieniu — naśladujący krzywiznę pustej przestrzeni ukrytą w słynnej stałej kosmologicznej Einsteina. Guth zakładał, że stała kosmologiczna miała bardzo dużą wartość. Jesteśmy przyzwyczajeni do myślenia, że pusta przestrzeń ma zerową gęstość, bo przecież jest pusta, czyli pozbawiona cząstek i promieniowania. Jednak próżnia pustej przestrzeni

może mieć gęstość energii dzięki obecności pól takich, jak wypełniające Wszechświat pole Higgsa. Energia próżni zależy od praw fizyki. Guth argumentował, że we wczesnym Wszechświecie słabe i silne oddziaływania jądrowe byłyby zunifikowane w postaci jednej supersiły, więc energia próżni w owym czasie (gdy prawa fizyki były inne) mogła być znacznie wyższa niż maleńka wartość, jaką widzimy dzisiaj. Czyli stała kosmologiczna nie jest w rzeczywistości stała (jak sądził Einstein), lecz może się zmieniać w czasie. W bardzo wczesnym Wszechświecie energia gęstości próżni mogła być bardzo wysoka. Towarzyszyło jej wysokie ujemne ciśnienie, zapewniając — dzięki regułom szczególnej teorii względności — że energia próżni, postrzegana przez różnych obserwatorów podróżujących z różną prędkością w przestrzeni, byłaby taka sama. Jak już wspomnieliśmy, energia gęstości próżni generuje przyciąganie, lecz ujemne ciśnienie działające w trzech kierunkach, generuje trzykrotnie silniejsze odpychanie. Zgodnie z równaniami Einsteina to mogło zmusić Wszechświat do przyspieszonej ekspansji, którą postulował Guth. Owo grawitacyjne odpychanie wywołało początkową ekspansję, którą nazywamy Wielkim Wybuchem.

Opcję w kształcie trąbki odkrył w 1917 roku Willem de Sitter, rozwiązując równania Einsteina dla przypadku pustej przestrzeni ze stałą kosmologiczną i niczym więcej. Bez materii, która równoważyłaby odpychające efekty stałej kosmologicznej, to rozwiązanie dało Wszechświat, którego ekspansja przyspiesza. Całe rozwiązanie jest nazywane przestrzenią de Sittera. Jest to czasoprzestrzeń 3-sfery, która zaczyna się z nieskończonym promieniem w nieskończonej przeszłości i ulega kontrakcji (kurczy się) z prędkością bliską prędkości światła. Odpychające efekty stałej kosmologicznej powodują jednak, że kontrakcja stopniowo zwalnia, aż się zatrzyma przy minimalnym promieniu — z talią o minimalnym obwodzie — a następnie zaczyna się rozszerzać. Pod wpływem odpychających efektów stałej kosmologicznej rozszerza się coraz szybciej, z prędkością coraz bliższą prędkości światła, aż po nieskończonym czasie (w nieskończonej przyszłości) rozszerzy się do nieskończonych rozmiarów. Diagram czasoprzestrzenny czasoprzestrzeni de Sittera wygląda jak gorset z wąską talią (il. 23.2). Diagram pokazuje jedną współrzędną przestrzenną wokół poziomego obwodu oraz współrzędną czasową wzdłuż pionowej osi. Przyszłość jest ku górze. Sukienka u dołu ilustruje fazę kontrakcji, talia w środku stanowi minimalny promień wszechświata rozszerzający się ku górze w kształt trąbki.



ILUSTRACJA 23.2. Diagram czasoprzestrzenny przestrzeni de Sittera. Podobnie jak na ilustracjach 22.4 i 22.5, przedstawiony jest tylko jeden wymiar przestrzenny oraz współrzędna czasowa

Credit: J. Richard Gott

Podobnie jak w modelu czasoprzestrzeni Friedmanna jedynym realnym obiektem na tym ilustracji jest powierzchnia w kształcie gorsetu. Wnętrze i zewnętrze gorsetu nie mają fizycznego znaczenia. Tylko powierzchnia jest rzeczywista. Poziome, okrągłe przekroje takiej czasoprzestrzeni w kształcie gorsetu pokazują obwód 3-sfery w poszczególnych momentach kosmicznego czasu. Okręgi są duże u dołu, osiągają minimum w talii, po czym ponownie stają się duże u góry, ukazując rozmiary wszechświata 3-sfery, w miarę jak się kurczy i rozszerza. Pionowe „fiszbiny gorsetu" reprezentują możliwe linie świata cząstek. Są to proste linie geodezyjne, wzdłuż których podróżowałyby modele ciężarówek, jadąc prosto przed siebie po powierzchni gorsetu. Fiszbiny zbliżają się w dolnej części, osiągają minimalną odległość w talii, po czym rozchodzą się w górnej części. W górnej części krzywizna czasoprzestrzeni powoduje, że cząstki przyspieszają, oddalając się od siebie. Gdy cząstki się rozbiegają, przyspieszając i oddalając się z prędkością coraz bliższą prędkości światła, ich zegary spowalniają eksponencjalnie. Ich zegary s_p__o___w___a____l_____n_____i_____a_____j_____ą. W późniejszej fazie tej ekspansji obwód rośnie w ogromnym tempie. Diagram pokazuje wprawdzie, że przestrzeń rozszerza się w przybliżeniu liniowo z prędkością zbliżoną do prędkości światła (otwór stożka jest otwarty pod kątem bliskim 45°), w czasie mierzonym przez eksponencjalnie spowalniające zegary niesione przez same cząstki, ale obwód podwaja się po każdym kolejnym interwale czasowym, rosnąc jak 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, ..., co daje eksponencjalnie przyspieszającą ekspansję. To przypomina inflację waluty, dlatego Guth nazwał ten proces inflacją.

Przyjrzyj się talii. Jest to okrąg reprezentujący wszechświat 3-sfery w punkcie maksymalnej kontrakcji. Pamiętaj, że to rzeczywiście jest 3-sfera. Możemy oznaczyć punkt po lewej stronie tego okręgu jako „biegun północny" tego wszechświata. Tam mieszkałby Święty Mikołaj. Czerwony fiszbin po lewej stronie gorsetu jest linią świata Świętego Mikołaja mieszkającego na biegunie północnym 3-sfery. Czarny fiszbin po prawej stronie, oddalony o 180° na okręgu, reprezentuje linię świata pingwina mieszkającego na biegunie południowym. Święty Mikołaj, którego linia świata jest na biegunie północnym, nigdy nie zobaczy pingwina żyjącego na biegunie południowym. Wiązka światła wysłana przez pingwina w nieskończonej przeszłości będzie biec pod kątem 45° w górę i w lewo, przejdzie z przodu gorsetu jak diagonalna szarfa, lecz nigdy nie dotrze do linii świata Świętego Mikołaja po lewej stronie gorsetu. W tym wszechświecie istnieją horyzonty zdarzeń. Święty Mikołaj nigdy nie zobaczy niczego, co się przydarzy pingwinowi — nigdy nie zobaczy niczego powyżej i na prawo od tej szarfy. Popatrzmy na linię świata dziecka mieszkającego w pobliżu Świętego Mikołaja (zielona linia na il. 23.2). Wiązka światła wysłana przez to dziecko dotrze do Świętego Mikołaja. Święty Mikołaj zobaczy dziecko w późniejszej fazie, oddalające się od niego i przyspieszające.

Światło wysłane przez dziecko będzie coraz bardziej przesunięte ku czerwieni. Jeżeli dziecko wyśle Świętemu Mikołajowi wiadomość „SPRAWY MAJĄ SIĘ FAJNIE", Święty Mikołaj otrzyma „SPRAWY M_A__J___Ą", ale nigdy nie otrzyma reszty, „SIĘ FAJNIE". Sygnał „SIĘ" biegnie wzdłuż tej diagonalnej szarfy i nigdy nie dotrze do celu. Święty Mikołaj widzi tę sytuację tak, jakby dziecko wpadało do czarnej dziury. Gdy linia świata dziecka przetnie tę biegnącą pod kątem 45° szarfę, która jest horyzontem zdarzeń Świętego Mikołaja, sygnały od dziecka przestaną docierać do Świętego Mikołaja. Przestrzeń między dzieckiem i Świętym Mikołajem rozszerza się tak szybko, że sygnał „FAJNIE" wyemitowany po drugiej stronie szarfy nie pokona powiększającej się odległości między Świętym Mikołajem a dzieckiem. To nie łamie reguł szczególnej teorii względności. Reguły te mówią tylko, że czyjaś rakieta nie może minąć cię z prędkością większą od prędkości światła. Jednak ogólna teoria względności dopuszcza, aby przestrzeń między dwiema cząstkami rozszerzała się tak szybko, że światło nie może pokonać powiększającej się odległości między nimi. Czasoprzestrzeń de Sittera wyjaśnia, że cząstki mogą się komunikować i osiągnąć równowagę termiczną w pobliżu talii, a następnie rozbiec się na duże odległości.

Ostatecznie Guth zasugerował, że wszechświat de Sittera zaczyna się w talii z małym obwodem, który według dzisiejszych oszacowań mógł mieć w przybliżeniu 3×10^{-27} centymetrów. Fazę kontrakcji (dolną część pełnego diagramu) wyeliminował. Potrzebował tylko trochę próżni o wysokiej gęstości na początku. Odpychające efekty dużego ujemnego ciśnienia spowodowałyby początek ekspansji, która następnie przyspieszała. Rozmiar Wszechświata podwajał się co 10^{-38} sekundy. Wszechświat stałby się bardzo duży. W miarę rozszerzania Wszechświata gęstość energii próżni pozostawała stała. Stała kosmologiczna pozostawała stała. Mały obszar o wysokiej gęstości energii rozszerzyłby się i stałby się dużym obszarem o takiej samej, wysokiej gęstości energii.

Co ciekawe, to nie łamie lokalnej zasady zachowania energii. Załóżmy, że mam pudełko z cieczą o wysokiej gęstości i ujemnym ciśnieniu. Gdybym chciał powiększyć pudełko, musiałbym wykonać pracę, aby ciągnąć ściany przeciwko ujemnemu ciśnieniu, które przeciwstawia się rozciąganiu. Praca, którą wykonam, ciągnąc ściany przeciwko ujemnemu ciśnieniu (czyli ssaniu), zwiększy energię cieczy — akurat w takim stopniu, aby utrzymać gęstość energii na tym samym poziomie, gdy objętość pudełka się powiększa. Czyli zasada zachowania energii byłaby lokalnie spełniona. Ale co ciągnie ściany mojego pudełka we Wszechświecie? Ujemne ciśnienie innych, podobnych, sąsiednich pudełek w czasoprzestrzeni. Dopóki ciśnienie jest jednorodne w całym Wszechświecie, pracę wykonuje sama ekspansja.

W ogólnej teorii względności z przyczyn zasadniczych nie da się zdefiniować gęstości energii grawitacji, w rezultacie całkowita energia materii i grawitacji w całym wszechświecie nie jest dobrze zdefiniowana i w konsekwencji nie istnieje ogólne prawo jej zachowania. Całkowita energia materii i grawitacji daje się zdefiniować w szczególnych czasoprzestrzeniach i wtedy jest zachowywana, ale światy kosmologiczne do tej grupy nie należą. W

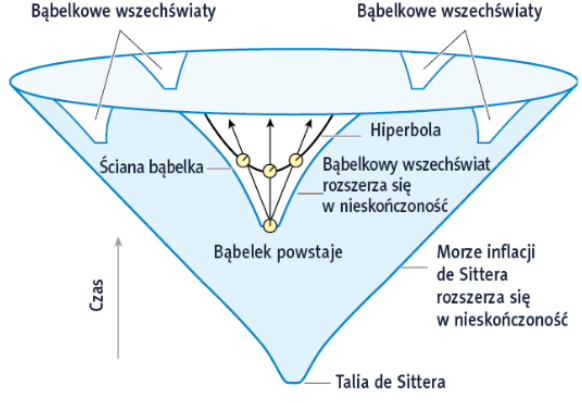
kosmologii Friedmanna całkowitą energią wszechświata nazywamy sumę energii materii (w obecnym przypadku próżni z dodatnią gęstością energii i ujemnym ciśnieniem) zawartej we wszystkich komórkach przestrzeni. Jeżeli przestrzeń jest 3-sferą, to liczba komórek jest skończona i taka energia jest skończona. Ta energia nie jest zachowana w czasie. Całkowita energia Wszechświata może rosnąć w czasie, jeżeli ciśnienie jest ujemne. To pozwoliło Guthowi sformułować jego inflacyjny model, w którym maleńki obszar próżni o wysokiej gęstości energii powiększa się i powstaje z niego duży Wszechświat o takiej samej, wysokiej gęstości energii. W tym sensie stan próżni podlegał „samoreprodukcji", rosnąc eksponencjalnie od maleńkich początków do rozmiarów Wszechświata. Guth określił ten proces jako „ostateczny darmowy obiad". Gdy w końcu słabe i silne oddziaływania jądrowe się rozprzęgną, stan próżni rozpadnie się, gęstość energii próżni w pustej przestrzeni spadnie do małej wartości, a pierwotna, wysoka energia próżni zostanie przekształcona i pojawi się w postaci cząstek elementarnych. Wszechświat wypełni termiczny rozkład cząstek elementarnych.

W tym momencie inflacyjna trąbka Gutha na początku Wszechświata łączy się z dolną częścią futbolowej piłki reprezentującej Friedmannowski model Wielkiego Wybuchu. Ekspansja Wszechświata zaczyna zwalniać jak w modelu Friedmanna. Ciśnienie jest teraz zwykłym, dodatnim, termicznym ciśnieniem cząstek. Linie świata, które powiedziały sobie nawzajem „do widzenia" w czasie przyspieszającej, inflacyjnej fazy (trąbki), jak Święty Mikołaj i dziecko, powiedzą teraz „witam ponownie", gdy zacznie się spowalniająca ekspansję faza Friedmanna. Inflacja wyjaśnia, że początkowe warunki modelu Wielkiego Wybuchu Friedmanna mogły powstać w naturalny sposób. Wielki Wybuch uruchomiły odpychające grawitacyjne efekty (ujemne ciśnienie) początkowego stanu próżni! Wielki Wybuch nie musiał się zacząć w osobliwości, lecz mógł powstać z małego obszaru próżni o wysokiej gęstości. Inflacja może wyjaśnić, dlaczego Wszechświat jest tak duży i dlaczego jest tak jednorodny. Wszelkie zmarszczki byłyby wygładzone, gdy Wszechświat rozszerzał się do ogromnych rozmiarów. Inflacja może także wyjaśnić fluktuacje CMB rzędu 1/100 000, które obecnie obserwujemy. Są to małe, losowe fluktuacje kwantowe wynikające z zasady nieoznaczoności Heisenberga. Początkowo rozmiar Wszechświata podwajał się co 10^{-38} sekundy. W tak małych skalach czasowych zasada nieoznaczoności generuje fluktuacje energii dowolnego pola. W istocie kosmiczna pajęczyna — grupowanie galaktyk we wzory przypominające gąbkę, które obecnie obserwujemy we Wszechświecie, a także układ gorących i zimnych plam w CMB wskazują, że fluktuacje warunków początkowych były dokładnie takie, jakie wynikałyby z losowych fluktuacji kwantowych przewidywanych przez inflację (więcej na ten temat w mojej książce *Kosmiczna pajęczyna*).

Inflacja miała jednak pewien problem, z którego Guth zdawał sobie sprawę. Początkowy stan próżni o wysokiej gęstości nie rozpadłby się momentalnie (w jednej chwili) na cząstki elementarne. W próżni wysokiej gęstości pojawiłyby się bąble próżni niskiej gęstości — to zjawisko badał Sidney Coleman. Podobnie przebiega proces gotowania wody. Woda nie zamienia się w parę

momentalnie (w jednej chwili). W gotującej się wodzie pojawiają się bąble pary. Ale w ten sposób nie powstałby jednorodny Wszechświat, którego oczekujemy. Guth przyznał, że jest to problem i w 1981 roku zaproponował wersję, w której inflacja produkuje „wszechświaty bąbelkowe" — każdy bąbelek rozszerza się i tworzy osobny wszechświat — taki jak nasz (il. 23.3).

W moim teoretycznym modelu żyjemy wewnątrz jednego z bąbelków o niskiej gęstości. Na ilustracji zaznaczyłem, że skoro rozpad energii próżni nie był natychmiastowy, to po powstaniu bąbelka rozpad nastąpiłby na hiperbolicznej powierzchni, tworząc jednorodną, hiperboliczną kosmologię Friedmanna o ujemnej krzywiźnie (odwołuję się tu do il. 22.6). Z wewnątrz patrzymy w przestrzeń i wstecz w czasie, więc widzimy tylko nasz bąbelkowy wszechświat i jednorodne morze inflacji, zanim bąbelek powstał. Wszystko co widzimy, jest jednorodne — co rozwiązuje problem Gutha z niejednorodnością. Bąbelek rozszerza się z prędkością bliską prędkości światła, ale morze inflacji rozszerza się tak szybko, że bąbelki nigdy nie wypełnią całej przestrzeni. Nieustannie powstają nowe bąbelkowe wszechświaty, a morze inflacji rozszerza się między nimi, tworząc miejsce dla kolejnych bąbelkowych wszechświatów. Wyobraziłem sobie nieskończoną liczbę bąbelkowych wszechświatów powstających w nieustannie rozszerzającym się morzu inflacji, które obecnie nazywamy wieloświatem[8]. Te bąbelkowe wszechświaty miałyby wewnątrz ujemną krzywiznę i rozszerzałyby się w nieskończoność — byłyby hiperbolicznymi wszechświatami Friedmanna. Powierzchnie stałej epoki byłyby hiperbolami zanurzonymi wewnątrz rozszerzającego się bąbelka. Powierzchnia stałej epoki to powierzchnia, na której budziki na wszystkich pojedynczych cząstkach równocześnie dzwonią, pokazując stały czas od momentu powstania bąbelka. Ma ona kształt hiperboloidy, ponieważ na cząstkach biegnących szybciej zegary tykają wolniej, a zatem moment, gdy te zegary dzwonią, jest opóźniony (por. il. 22.6). Wynika stąd hiperboliczny kształt rozciągający się do nieskończoności, gdyż wygina się w górę wewnątrz rozszerzającej się ściany bąbelka (il. 23.3). Ostatecznie, gdy w przyszłości bąbelek rozszerzy się do nieskończonej objętości po nieskończonym czasie, powstanie nieskończona liczba galaktyk. W ten sposób nieskończona liczba nieskończonych bąbelkowych wszechświatów może powstać z początkowo bardzo małej, o wysokiej gęstości przestrzeni de Sittera.



ILUSTRACJA 23.3. Bąbelkowe wszechświaty powstające w morzu inflacji — wieloświat

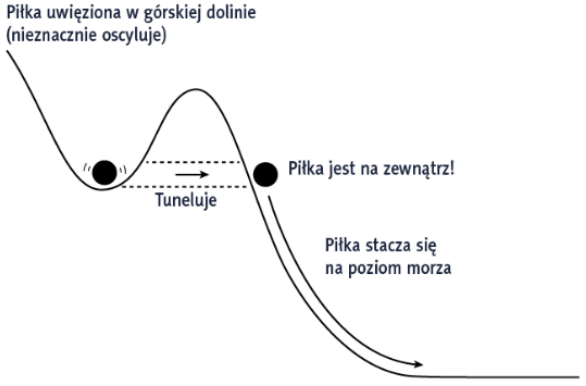
Credit: J. Richard Gott, *Time Travel in Einstein's Universe*, Houghton Mifflin, 2001

To może się wydawać dziwne. Jak ze skończonego początku może powstać nieskończona liczba wszechświatów, każdy o nieskończonych rozmiarach? Czasoprzestrzeń de Sittera wygląda jak niewielka trąbka z czarą głosową otwierającą się ku górze. Poziomy przekrój ustnika trąbki — przez talię przestrzeni de Sittera — jest okręgiem. Jest to mały wszechświat 3-sfery o skończonym obwodzie i skończonej objętości, tak jak wyobrażał sobie Einstein. Ale górna część trąbki jest stożkiem, a stożek można przeciąć na kilka sposobów — przecięcie może być okręgiem, parabolą lub hiperbolą, w zależności od tego, pod jakim kątem jest wykonane. Jeżeli przetniesz czasoprzestrzeń de Sittera poziomo, dostaniesz okrąg — wszechświat 3-sfery. Jeżeli przetniesz ją pod kątem 45°, dostaniesz parabolę i nieskończony, płaski wszechświat. Jeżeli przetniesz stożek pionową płaszczyzną, dostaniesz hiperbolę — to będzie nieskończony, ujemnie zakrzywiony wszechświat. Jak w bajce o ślepcach i słoniu. Jeden ślepiec obmacał trąbę i stwierdził, że słoń ma kształt węża. Drugi ślepiec obmacał nogę i stwierdził, że słoń ma kształt pnia drzewa. Trzeci ślepiec obmacał bok słonia i stwierdził, że słoń jest jak ściana. Na tej samej zasadzie kształt przestrzeni de Sittera zależy od tego, jak ją przetniesz. Jeżeli wykonasz hiperboliczne cięcie wewnątrz bąbelkowego wszechświata, który rozciąga się do nieskończoności, to otrzymasz przestrzeń rozciągającą się do nieskończoności, poczynając od epoki,w której inflacyjna próżnia de Sittera się kończy i zamienia swoją energię w cząstki, a zaczyna się model Friedmanna. Podobnie jak w przypadku bochenka chleba, który można przeciąć na różne sposoby, aby otrzymać amerykańskie kromki lub francuskie kromki, realny jest sam bochenek. Jeżeli w geometrii czasoprzestrzeni de Sittera szukamy modelu inflacyjnego, widzimy, że zaczyna się w talii na skończonym wszechświecie 3-sfery, po czym rozszerza się w nieskończoność, do nieskończonych rozmiarów. Ta zadziwiająca geometria czasoprzestrzeni, w której inflacja trwa w nieskończoność, a przestrzeń staje się nieskończenie duża, pozwala na stworzenie nieskończonej liczby nieskończonych wszechświatów bąbelkowych w nieustannie rozszerzającym się morzu inflacji.

W różnych wszechświatach bąbelkowych mogą obowiązywać różne prawa fizyki, jeżeli różne bąbelki odpowiadały tunelowaniu i staczaniu się w różne doliny krajobrazu, gdzie wartości różnych pól mogły być różne. Prawa fizyki, które obowiązują w naszym wszechświecie, mogą być tylko lokalnymi prawami (ang. *bylaws*), jak podkreślają Andrei Linde i Martin Rees.

Jest istotne, aby inflacyjny wszechświat de Sittera zaczął się w talii. Nie chcemy poprzedzającej inflację fazy nieskończonej kontrakcji. Arvin Borde i Alex Vilenkin pokazali, że w fazie kontrakcji także powstawałyby bąbelki o niskiej gęstości, które rozszerzałyby się w kurczącej się przestrzeni. Bąbelki zderzałyby się ze sobą, wypełniłyby całą przestrzeń, zakończyłyby inflację i uniemożliwiłyby osiągnięcie talii i fazy ekspansji. Dostałbyś osobliwość Wielkiego Krachu; bąbelki nie miałyby wewnątrz ujemnego ciśnienia, które wymusza przejście talii. Borde i Vilenkin doszli do wniosku, że początek

inflacyjnego wieloświata stanowi skończony obszar inflacyjnego morza. Prawdopodobnie jest mały, rzędu 3×10^{-27} centymetra. To nie jest nic, ale prawdopodobnie jest tak mały, że mniejszy już nie może być.



ILUSTRACJA 23.4. Tunelowanie kwantowe

Credit: J. Richard Gott, *Time Travel in Einstein's Universe*, Houghton Mifflin, 2001

Gęstość energii próżni można porównać do wysokości w górzystym krajobrazie. Wysokość reprezentuje gęstość energii próżni, gęstość energii pustej przestrzeni. Różne miejsca w krajobrazie reprezentują różne wartości pól (takich jak pole Higgsa), którym odpowiadają różne wartości energii próżni. Różnym położeniom (różnym wartościom pól) odpowiadają różne wysokości (różne wartości gęstości energii próżni). Dzisiaj mamy bardzo niską wartość gęstości energii próżni — jesteśmy w pobliżu poziomu morza — ale we wczesnym wszechświecie gęstość energii próżni mogła być bardzo wysoka. Można powiedzieć, że była uwięziona w dolinie położonej wysoko w górach (il. 23.4).

Piłka uwięziona w górskiej dolinie znajduje się w położeniu niestabilnym — istnieje poziom o niższej energii, do którego piłka może przeskoczyć. Ale może zostać uwięziona, jeżeli ze wszystkich stron jest otoczona przez góry. We wszechświecie Newtona nie byłoby sposobu, aby mogła się stoczyć w dół, lecz w mechanice kwantowej istnieje zjawisko zwane kwantowym tunelowaniem, które pozwala piłce przeniknąć przez otaczające góry i stoczyć się do morza[9].

Proces tunelowania kwantowego odkrył George Gamow. Tunelowanie kwantowe stanowi między innymi wyjaśnienie radioaktywnego rozpadu uranu. Jądra uranu rozpadają się, emitując cząstki alfa (jądra helu z dwoma protonami i dwoma neutronami). Cząstka alfa jest uwięziona wewnątrz jądra przez silne oddziaływanie jądrowe, które przyciąga ją do innych protonów i neutronów. Silne oddziaływanie można porównać do pasma wzgórz otaczających dolinę, w której jest uwięziona cząstka alfa. Ale silne oddziaływanie jest krótkozasięgowe; gdyby cząstka alfa mogła w jakiś sposób wydostać się z jądra, poza zasięg silnego oddziaływania, mogłaby uciec. Cząstka alfa jest dodatnio naładowana, więc byłaby odpychana przez dodatnio naładowane jądro. Stoczyłaby się po zboczu góry, daleko od jądra, a jej energia kinetyczna pochodziłaby od elektrostatycznego odpychania. Fizycy zmierzyli energie cząstek alfa emitowanych przez rozpadające się jądra uranu, i na tej podstawie obliczyli, jak wysoko na zboczu góry cząstka zaczyna się staczać.

Okazało się, że emisja następuje na zewnątrz jądra uranu! W jaki sposób cząstka się tam znalazła? W mechanice kwantowej nie tylko światło ma dualną naturę — falową i cząstkową — lecz także obiekty, które zwykle nazywamy cząstkami, na przykład cząstki alfa. Falowa natura cząstki alfa oznacza, że cząstka nie jest dokładnie zlokalizowana, co opisuje zasada nieoznaczoności Heisenberga. Gamow odkrył, iż istnieje niewielkie prawdopodobieństwo, że cząstka alfa może „przetunelować" przez górę, która trzyma ją wewnątrz jądra uranu, i nagle znaleźć się na zewnątrz jądra, gdzie może się stoczyć w dół ze zbocza góry, daleko od jądra, w wyniku elektrostatycznego odpychania. Przypomina mi to koan w filozofii zen: „Jak kaczka wydostała się z butelki?" (szyjka butelki jest zbyt wąska, aby kaczka mogła uciec). Odpowiedź: „Kaczka jest na zewnątrz!". Cząstka alfa tuneluje przez barierę i „cząstka alfa jest na zewnątrz". To kolejny dobry powód, by Gamow mógł dostać nagrodę Nobla.

W przypadku bąbelkowego wszechświata górska dolina reprezentuje początkowy inflacyjny wszechświat (w talii przestrzeni de Sittera) wraz z jego wysoką gęstością energii próżni. Mógłby na zawsze pozostać w stanie o wysokiej gęstości energii, ale w dłuższym czasie istnieje niewielkie prawdopodobieństwo, że może „przetunelować" przez górę, gdzie stoczy się na poziom morza, uwalniając energię próżni w postaci energii kinetycznej oraz w postaci zwykłych cząstek elementarnych. Tunelowanie polega w tym przypadku na tym, że powstaje mały bąbelek o gęstości energii próżni wewnątrz bąbelka nieco mniejszej niż gęstość energii próżni na zewnątrz. Ujemne ciśnienie na zewnątrz bąbelka jest silniejsze niż ujemne ciśnienie wewnątrz bąbelka, więc różnica ciśnienia ciągnie ścianę bąbelka na zewnątrz. Bąbelek się rozszerza coraz szybciej; tempo rozszerzania zbliża się do prędkości światła. W międzyczasie wewnątrz bąbelka gęstość energii próżni powoli stacza się wzdłuż zbocza góry do poziomu morza. Inflacja trwa przez chwilę wewnątrz bąbelka, który stacza się z góry. Gdy dotrze do poziomu morza i zdeponuje swoją energię próżni w postaci cząstek, inflacja się zatrzyma i zacznie się faza Friedmanna. Taki scenariusz opublikował Andrei Linde, a także niezależnie Andreas Albrecht i Paul Steinhardt, wkrótce po tym, jak ukazał się mój artykuł. Na zewnątrz bąbelka stan próżni pozostaje wysoko w górskiej dolinie i nieskończone morze inflacji kontynuuje swoją szybką, przyspieszającą ekspansję. Ja przeanalizowałem, w ramach ogólnej teorii względności, geometrię dotyczącą powstawania bąbelkowych wszechświatów tworzących to, co dzisiaj nazywamy wieloświatem, natomiast Linde oraz Albrecht i Steinhardt niezależnie zaproponowali szczegółowe scenariusze — w ramach fizyki cząstek — które umożliwiłyby powstawanie bąbelkowych wszechświatów. Mój model wymagał, aby inflacja trwała przez chwilę w bąbelkowym wszechświecie, by stworzyć wszechświat, w którym żyjemy. W modelach Lindego oraz Albrechta i Steinhardta to zdarzyło się w naturalny sposób, gdyż gęstość energii próżni w bąbelku potrzebowała trochę czasu, aby powoli stoczyć się ze zbocza góry do poziomu morza. Później, w 1982 roku, Stephen Hawking opublikował artykuł, w którym przyjął ideę bąbelkowego wszechświata i udowodnił, że początkowe fluktuacje kwantowe zostałyby

rozciągnięte przez inflację do skali kosmologicznej, przybierając dokładnie taką formę, jaka jest potrzebna, aby skutecznie zapoczątkować powstawanie galaktyk i gromad galaktyk we wszechświecie[10]. Struktura — opisana w rozdziale 15 — która została później zaobserwowana zarówno w CMB, jak i w rozkładzie galaktyk, wspaniale zgadza się z przewidywaniami wynikającymi z inflacji.

Zderzenie naszego Wszechświata z sąsiednim wszechświatem bąbelkowym jest wprawdzie możliwe w odległej przyszłości (może po 10^{1800} latach), tworząc nagle gorący obszar na niebie, którego promieniowanie prawdopodobnie zabije wszelkie formy życia, ale większość innych wszechświatów w wieloświecie jest na zawsze ukryta przed naszym wzrokiem za horyzontem zdarzeń. Są tak daleko, że ich światło nigdy nie przekroczy morza inflacji leżącego między nimi i nami. Dzisiaj wydaje się już jasne, że raz zaczętą inflację niełatwo zatrzymać. Będzie się wiecznie rozszerzać, tworząc wieloświat z nieskończoną liczbą wszechświatów takich jak nasz. W 1983 roku Linde zaproponował chaotyczną inflację, która produkuje także wieloświat kieszonkowych wszechświatów o niskiej gęstości w nieustannie rozszerzającym się morzu inflacji. Model chaotycznej inflacji Lindego opierał się na kwantowych fluktuacjach, które losowo kreują obszary o różnych wartościach gęstości energii. Im większa wysokość, tym większa gęstość energii i tym krótszy czas podwajania dla ekspansji. Na dużej wysokości przy wyższym tempie inflacji więcej przestrzeni o wysokiej gęstości energii próżni powstaje w szybszym tempie. Obszary na dużej wysokości szybciej się reprodukują. Można to porównać do sytuacji, w której ludzie mają więcej dzieci, jeżeli wyżej mieszkają. Po kilku pokoleniach niemal wszyscy mieszkaliby w górach. Cały wieloświat podlegałby szybkiej inflacji. Pojedyncze obszary mogłyby się staczać w dolinę, tworząc kieszonkowe wszechświaty takie jak nasz. Większość objętości przestrzeni znalazłaby się w szybko rozszerzających się górskich obszarach, ale wciąż pojawiałyby się kolejne kieszonkowe wszechświaty staczające się do poziomu morza. A więc w gruncie rzeczy nie musimy zaczynać w górskich dolinach. Wydaje się, że w inflacyjnym multiświecie wszechświaty o niskiej gęstości — takie jak nasz — będą powstawać w dowolnym krajobrazie.

Nie widzimy wprawdzie innych wszechświatów wieloświata, ale mamy powody, aby sądzić, że one istnieją, ponieważ wydaje się, iż są nieuniknioną konsekwencją teorii inflacji, która wyjaśnia ogromne bogactwo danych obserwacyjnych.

Wyniki obserwacji satelitów WMAP i Planck dostarczyły ważnych argumentów na rzecz inflacji. Amplituda fluktuacji temperatury, obserwowanych w różnych skalach kątowych w CMB, pasuje dokładnie do wzoru przewidywanego przez model inflacji (por. il. 15.3). Wyniki te wskazują zarazem, że krzywizna Wszechświata jest w przybliżeniu zerowa. We wszechświecie o dodatniej krzywiźnie widzielibyśmy mniej plam na mapie mikrofalowego tła, ponieważ obwód dużego okręgu byłby mniejszy niż $2\pi r$, które wynika z geometrii euklidesowej. Gdyby krzywizna była ujemna, obwód byłby większy niż $2\pi r$, byłoby więcej plam, a plamy miałyby mniejsze

rozmiary kątowe niż w geometrii euklidesowej. Maksimum amplitudy fluktuacji temperatury obserwujemy w skali kątowej około 1°, co zgadza się z zerową wartością krzywizny Wszechświata.

Oznacza to, że nie znamy znaku krzywizny. Krzywizna Wszechświata jest tak mała, że nie potrafimy jej zmierzyć. Nasze obecne dane wskazują, że widoczny Wszechświat jest płaski, z dokładnością nieco lepszą niż 1%. Na takiej samej zasadzie boisko do koszykówki wydaje się płaskie, mimo iż wiemy, że leży na zakrzywionej powierzchni Ziemi. Promień Ziemi jest jednak tak duży w porównaniu z rozmiarami boiska, że krzywizna boiska jest niezauważalna. Niegdyś ludzie sądzili, że Ziemia jest płaska, ponieważ ten mały fragment Ziemi, który mieli w polu widzenia, był w przybliżeniu płaski. W istocie wiemy tylko, że promień krzywizny Wszechświata jest znacznie większy niż owe 13,8 miliarda lat świetlnych, które mamy w polu widzenia — aż po CMB. Guth podkreślał, że niezależnie od początkowego kształtu Wszechświata (dodatnio lub ujemnie zakrzywionego) w najprostszych modelach inflacja zazwyczaj powoduje tak dużą ekspansję, że Wszechświat jest znacznie większy niż to, co możemy zbadać. Guth przewidywał, że Wszechświat jest w przybliżeniu płaski, i miał rację. Jeżeli nasz Wszechświat jest wszechświatem bąbelkowym, oznacza to, że inflacja trwała dość długo wewnątrz bąbelka, podczas gdy stan próżni staczał się wzdłuż zbocza góry po tunelowaniu. Ten „długi" okres inflacji, odpowiadający na przykład tysiącu podwojeń rozmiarów — z punktu widzenia wewnątrz bąbelka — mógł trwać raptem 10^{-35} sekundy, jeżeli czas jednego podwojenia wynosił 10^{-38} sekundy. To przekłada się na promień krzywizny obecnego Wszechświata 10^{274} razy większy od rozmiarów tej części, którą widzimy, więc wygląda, jakby był płaski.

Współczesne modele kosmologiczne są definiowane przez dwa parametry: Ω_m oraz Ω_Λ. Wartości tych parametrów określają historię ekspansji Wszechświata oraz decydują o tym, czy jest skończony (jak 3-sfera) czy nieskończony. Pierwszy parametr określa gęstość materii $\Omega_m = 8\pi G\rho_m/3H_0^2$, gdzie G jest stałą grawitacji Newtona, ρ_m jest średnią gęstością materii w obecnym Wszechświecie (z uwzględnieniem zarówno zwykłej, jak i ciemnej materii), a H_0 jest równe obecnej wartości stałej Hubble'a określającej szybkość ekspansji Wszechświata. Licznik ułamka ($8\pi G\rho_m$) określa gęstość Wszechświata (wynikającą z grawitacyjnego przyciągania), natomiast mianownik ($3H_0^2$) określa energię kinetyczną ekspansji. W prostych modelach Friedmanna, w których tylko materia jest istotna, Ω_m decyduje o tym, czy Wszechświat będzie się zawsze rozszerzał. Jeżeli $\Omega_m > 1$, to grawitacyjne przyciąganie przezwycięży energię kinetyczną ekspansji i Wszechświat ostatecznie się zapadnie: jest to czasoprzestrzeń 3-sfery Friedmanna w kształcie piłki futbolowej, przedstawiona na ilustracji 22.5. Jeżeli $\Omega_m < 1$, to energia kinetyczna ekspansji przezwycięży grawitacyjne przyciąganie i dostaniemy ujemnie zakrzywiony wszechświat Friedmanna, który będzie się zawsze rozszerzał. Jeżeli $\Omega_m = 1$, energia kinetyczna ekspansji

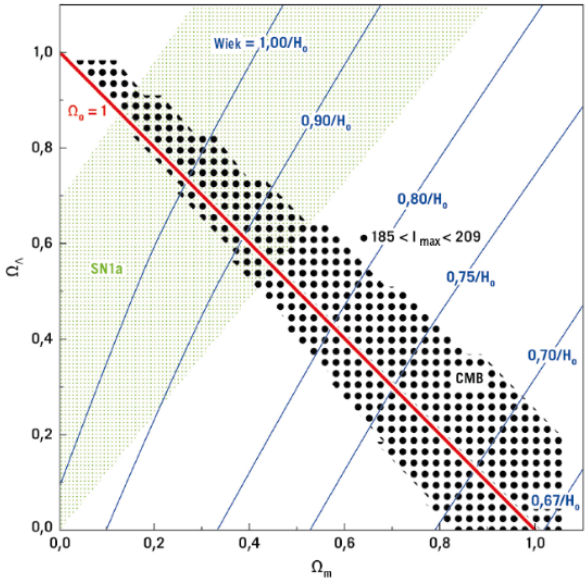
równoważy grawitacyjne przyciąganie i model jest płaski; wszechświat będzie się zawsze rozszerzał, coraz wolniej i wolniej, a gęstość i energia kinetyczna będą się zmniejszać. Wszystkie te modele Friedmanna mają $\Omega_\Lambda = 0$, gdyż w pustej przestrzeni mają zerową gęstość energii próżni — wszystkie leżą wzdłuż dolnej krawędzi na ilustracji 23.5.

Jeżeli energia próżni jest niezerowa, to musimy także wziąć pod uwagę drugi parametr, który określa gęstość energii próżni, a jest wyrażony wzorem $\Omega_\Lambda = 8\pi G\rho_{vac}/3H_0{}^2$, gdzie ρ_{vac} jest gęstością energii próżni (gęstością ciemnej energii) w dzisiejszym Wszechświecie. Stosujemy indeks Λ, aby pamiętać, że ciemna energia zachowuje się podobnie jak stała kosmologiczna Λ Einsteina. Pozioma współrzędna określa wartość Ω_m (gęstość materii), natomiast pionowa współrzędna reprezentuje Ω_Λ (energię próżni — ciemną energię). Każdy określony model kosmologiczny reprezentuje jeden punkt na ilustracji 23.5. Para współrzędnych — pozioma i pionowa (Ω_m, Ω_Λ) — reprezentuje określoną kombinację obecnych wartości gęstości materii i gęstości energii.

Jeżeli Ω_Λ nie jest równa zeru, dostajemy modele, które wypełniają diagram. Czerwona diagonalna linia reprezentuje zbiór płaskich modeli inflacyjnych, dla których $\Omega_0 = \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$. Modele na lewo od czerwonej linii mają kształt siodła i są nieskończone, modele na prawo od czerwonej linii to wszechświaty 3-sfer. Wykropkowany obszar w kształcie krawata reprezentuje modele spójne z wynikami kluczowego eksperymentu Boomerang, czyli obserwacji CMB przez teleskop wyniesiony w 1997 roku przez balon do stratosfery nad Antarktydą. Jego wyniki biegną dokładnie wzdłuż czerwonej linii, co oznacza, że CMB faworyzuje model płaski. Kolejne ograniczenie kosmologicznych modeli możemy uzyskać, mierząc historię ekspansji Wszechświata na podstawie obserwacji zależności przesunięcia ku czerwieni od odległości obiektów kosmologicznych (znajdujących się daleko od nas). Astronomowie wykorzystują do tego celu tak zwane supernowe typu Ia, które służą jako świece standardowe. Obszar dopuszczalny przez obserwacje supernowych typu Ia jest oznaczony na wykresie kolorem zielonym. Dane te wskazują, że ekspansja Wszechświata przyspiesza. Za to odkrycie Saul Perlmutter, Brian Schmidt i Adam Riess otrzymali w 2011 roku nagrodę Nobla. W modelach, w których $\Omega_\Lambda > \Omega_m/2$, ekspansja przyspiesza, gdyż grawitacyjne odpychanie ciemnej energii jest większe niż grawitacyjne przyciąganie zwykłej materii. Zielony obszar reprezentujący dane z supernowych spełnia tę nierówność, co oznacza, że ekspansja dzisiejszego Wszechświata przyspiesza (w modelach, w których $\Omega_\Lambda < \Omega_m/2$, ekspansja zwalnia). Wykropkowany, czarny pas w kształcie krawata krzyżuje się z zielonym pasmem, a ich przekrycie daje niewielki obszar wokół $\Omega_m \approx 0{,}30$ oraz $\Omega_\Lambda \approx 0{,}70$. Te wartości są spójne zarówno z pomiarami CMB, jak i z obserwacjami supernowych.

Co ciekawe, w strefie przekrywania tych dwóch obszarów leży wartość $\Omega_m \approx 0{,}30$ wynikająca z dynamicznych argumentów opartych na masach gromad galaktyk, ruchach pojedynczych galaktyk oraz wzrostu struktury Wszechświata. Dotyczą one zarówno zwykłej materii (barionów — protonów i neutronów), jak i ciemnej materii. Okazuje się, że znając wartość stałej

Hubble'a, która wynosi około 67 (km/s)/Mpc, możemy bezpośrednio wyznaczyć Ω_m oraz Ω_{barion}, mierząc względne wysokości parzystych i nieparzystych maksimów na ilustracji 15.3. Dostajemy $\Omega_{barion} \approx 0{,}05$ oraz $\Omega_m \approx 0{,}30$. Wynik z CMB zgadza się z kolei z analizą nukleosyntezy (opierającą się na podobnych argumentach, które wysunął Gamow, omówionych w rozdziale 15) i wskazuje, że większość materii Wszechświata istnieje w formie ciemnej materii ($\Omega_{darkmatter} \approx 0{,}25$), a nie w formie zwykłej materii (barionowej). Trwają opisane przez Michaela poszukiwania i badania mające na celu odkrycie natury ciemnej materii.



ILUSTRACJA 23.5. Modele kosmologiczne (Ω_m, Ω_Λ). Każdy punkt na wykresie reprezentuje określony model kosmologiczny z określoną wartością gęstości materii (odpowiadającą poziomej współrzędnej Ω_m) oraz gęstości energii (odpowiadającą pionowej współrzędnej Ω_Λ). Zielony wykropkowany obszar obejmuje modele dozwolone przez obserwacje supernowych Ia (SN1a) wskazujące, że ekspansja Wszechświata przyspiesza. Czarny wykropkowany obszar obejmuje modele dozwolone przez obserwacje mikrofalowego promieniowania tła (CMB), wykonane w latach 1997-2003 w ramach projektu Boomerang. Wstępne wyniki tego eksperymentu, opublikowane w 2000 roku, wskazują, że połączone dane z pomiarów CMB i obserwacji supernowych sugerują płaski Wszechświat ($\Omega_0 = \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$), z

wartościami $\Omega_m \approx 0{,}30$ oraz $\Omega_\Lambda \approx 0{,}70$. Ciemna energia stanowi 70% gęstości masy –energii Wszechświata. Wyniki późniejszych obserwacji z satelitów WMAP i Planck potwierdziły i w znacznym stopniu uprawdopodobniły ten wniosek

Credit: przedruk za zgodą MacMillan Publishers Ltd: „Nature", 404, P. de Bernardis i in., 27 kwietnia 2000

Niebieskie linie na ilustracji 23.5 pokazują wiek Wszechświata w jednostkach $1/H_0$. Faworyzowany model kosmologiczny leży w pobliżu linii oznaczonej „wiek = $1{,}00/H_0$".

Po opublikowaniu w 2000 roku wyników projektu Boomerang satelita WMAP zmierzył CMB z wysoką dokładnością i uściślił te oszacowania, produkując standardowy model kosmologiczny, który wyjaśnia wszystkie obserwacyjne ograniczenia. Satelita Planck potwierdził i jeszcze bardziej uściślił te oszacowania: $H_0 = 67$ (km/s)/Mpc; wiek Wszechświata = 13,8 miliarda lat; wartość $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$; w granicach błędów obserwacyjnych, te wyniki są spójne z płaskim modelem wszechświata z dokładnością lepszą niż 1%.

Wyniki obserwacji WMAP, łącznie z obserwacjami supernowych oraz innymi danymi, umożliwiły także prześledzenie historii ekspansji Wszechświata oraz obliczenie — przez zastosowanie równań Einsteina — stosunku ciśnienia do gęstości energii w ciemnej energii, kluczowej miary, zwanej po prostu *w*. Z obserwacji WMAP wynika wartość $w = -1{,}073 \pm 0{,}09$, zgodna z wartością -1, przewidywaną przez model stałej kosmologicznej Einsteina w ramach dokładności obserwacji. Podobną wartość otrzymał satelita Planck. Niedawno program Sloan Digital Sky Survey uzyskał wartość $w = -0{,}95 \pm 0{,}07$, korzystając z danych dotyczących grupowania galaktyk, fitowanych według wzoru opracowanego przez Zacka Slepiana i mnie. Stosując te same dane i ten sam wzór, ale z uwzględnieniem grawitacyjnego soczewkowania odległych galaktyk przez bliskie galaktyki, zespół satelity Planck uzyskał wartość $w_0 = -1{,}008 \pm 0{,}068$. Wszystkie te oszacowania są spójne, w ramach dokładności obserwacji, z wartością -1 przewidywaną dla energii próżni (ciemnej energii). Wiemy, że gęstość energii dla ciemnej energii jest dodatnia, ponieważ dodatnia gęstość energii ponad i poza zwykłą materią i ciemną materią jest niezbędna, aby Wszechświat był płaski (taki, jak obserwujemy). Wiemy, że ciśnienie ciemnej energii jest ujemne, ponieważ — zakładając, że gęstość energii ciemnej energii musi być dodatnia — tylko ujemne ciśnienie ciemnej energii może wygenerować grawitacyjne odpychanie, które powoduje przyspieszającą ekspansję Wszechświata (taką, jaką obserwujemy). Możemy nawet dokładnie zmierzyć to ujemne ciśnienie, aby się przekonać, że jest równe -1 razy gęstość energii ciemnej energii, w ramach dokładności obserwacji. Einstein byłby szczęśliwy! Jego stała kosmologiczna nie była jednak pomyłką!

Mówi się czasem, że ciemna energia jest jakąś tajemniczą siłą, która powoduje przyspieszenie ekspansji Wszechświata, i że nic nie wiemy na jej temat. To jest w części prawda. Bezpośrednio siłą, która powoduje przyspieszenie ekspansji Wszechświata, jest po prostu sama grawitacja. Jest

siłą odpychającą ze względu na ujemne ciśnienie towarzyszące ciemnej energii. Sądzimy, że ciemna energia znajduje się po prawej stronie równań Einsteina i jest zaliczana do źródeł grawitacji wraz ze wszystkimi znanymi nam formami materii (materią korpuskularną, promieniowaniem i wszelkimi innymi polami fizycznymi), albowiem interpretujemy ją jako egzotyczną, nieznaną fizyce laboratoryjnej postać materii (to nie są żadne cząstki!). Jeżeli natomiast ciemną energię utożsamić matematycznie ze stałą kosmologiczną (co jest zasadne przy czysto fenomenologicznej interpretacji obserwacji), to należy odpowiadający jej wyraz w równaniach Einsteina przenieść na lewą stronę i włączyć do czystej grawitacji. Obecnie przeważa pogląd, że jest ona formą materii, a nie składnikiem grawitacji. Być może w odległej przeszłości ciemnej energii było więcej i wtedy mogła być źródłem inflacji. Podejrzewamy, że ciemna energia jest jakąś formą energii próżni generowaną przez pole lub pola, lecz nie znamy natury tego pola lub tych pól. Wiemy, że ilość ciemnej energii jest w przybliżeniu stała w czasie, lecz nie wiemy, czy powoli się zmniejsza („stacza się ze zbocza góry"), czy rośnie („wtacza się pod górę"). Są to tematy aktualnych badań.

W ramach programu obserwacyjnego Sloan Digital Sky Survey wykonano dokładny pomiar stałej Hubble'a, stosując charakterystyczną skalę grupowania galaktyk odpowiadającą oscylacjom widocznym we fluktuacjach w CMB na ilustracji 15.3. W ten sposób można było wyznaczyć ogólną skalę bez korzystania z (gwiazd zmiennych) cefeid, natomiast dane dotyczące supernowych wykorzystano do wykreślenia szczegółowego przebiegu stałej Hubble'a w funkcji czasu. Zmierzona w ten sposób wartość stałej Hubble'a wyniosła $H_0 = 67{,}3 \pm 1{,}1$ (km/s)/Mpc. Oznacza to, że gęstość ciemnej energii wynosi około $6{,}9 \times 10^{-30}$ grama na centymetr sześcienny. Gdybyśmy narysowali sferę ze środkiem w Ziemi i promieniem równym promieniowi orbity Księżyca, ciemna energia wewnątrz tej sfery stanowiłaby ekwiwalent 1,6 kilograma (znikoma w porównaniu z masą Ziemi), tak mało, że nie dostrzegamy jej grawitacyjnego oddziaływania na orbitę Księżyca — ani grawitacyjnego przyciągania, ani grawitacyjnego odpychania przez jej ujemne ciśnienie. Ale w skali kosmologicznej, w której średnia gęstość materii (zwykłej i ciemnej) wynosi tylko 3×10^{-30} grama na centymetr sześcienny, efekty grawitacyjnego oddziaływania ciemnej energii są poważne.

Wyznaczenie parametrów tego modelu kosmologicznego z tak niewielkimi błędami pomiarowymi stanowi nie lada osiągnięcie. Satelity WMAP i Planck wykonały szczegółowe pomiary amplitudy fluktuacji CMB w funkcji skali kątowej, która z niezwykłą dokładnością zgadza się z przewidywaniami modelu inflacji (jak pokazaliśmy na il. 15.3). To istotna eksperymentalna weryfikacja i potwierdzenie hipotezy inflacji. A obserwowana dzisiaj ciemna energia ma dokładnie taką formę (i bardzo małą gęstość), jaka była niezbędna we wczesnym Wszechświecie.

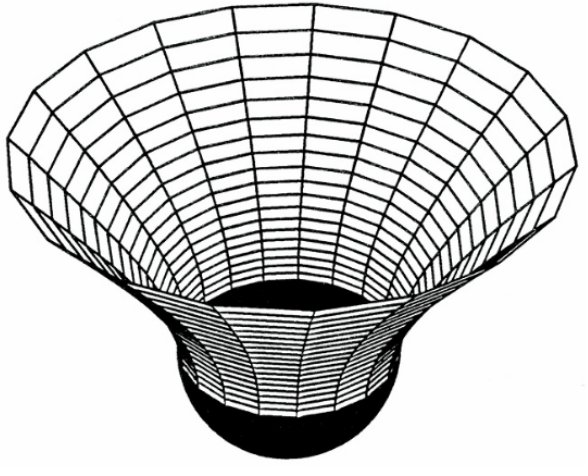
Niedawno zaproponowano nowy, niezależny test hipotezy inflacji. Jeżeli w fazie inflacji rozmiary Wszechświata podwajały się mniej więcej co 10^{-38} sekundy, to zasięg obserwacji w tym okresie był ograniczony do odległości 10^{-38} sekundy świetlnej, czyli 3×10^{-28} centymetra. To bardzo mała odległość,

więc — zgodnie z kwantowo-mechaniczną zasadą nieoznaczoności Heisenberga — pojawiły się fluktuacje geometrii czasoprzestrzeni (zmarszczki), które, jak wynika z równań Einsteina, rozprzestrzeniają się z prędkością światła. Są to fale grawitacyjne, które powinny pozostawić charakterystyczne ślady w mikrofalowym promieniowaniu tła, a mianowicie powinny wywołać rotację polaryzacji CMB. Jak dotąd te fale grawitacyjne okazały się nieuchwytne. Obecnie najlepsza górna granica — pochodząca z satelity Planck oraz z naziemnych eksperymentów Keck i BICEP2 — leży nieco poniżej wartości wynikających z najprostszego modelu chaotycznej inflacji Lindego. Amplituda fal grawitacyjnych zależy od konkretnego kształtu zbocza góry, z którego się staczamy (zob. il. 23.4). Zespół Plancka uważa, że do danych obserwacyjnych najlepiej pasuje model inflacyjny, którego autorem jest Aleksiej Starobinsky; jego czas podwajania wynosi 3×10^{-38} sekundy pod koniec epoki inflacyjnej, wobec 5×10^{-39} sekundy w najprostszym modelu Lindego. Sześć razy mniej gwałtowna ekspansja wyprodukowałaby fale grawitacyjne o sześć razy mniejszej amplitudzie — znacznie poniżej obecnej górnej granicy. Aktualnie realizowanych jest kilka eksperymentów obserwacyjnych — łącznie ze stratosferycznymi lotami balonów oraz naziemnymi obserwacjami na Antarktydzie — których celem jest zmniejszenie błędów pomiarowych oraz dalsze testy modeli inflacyjnych. Astronomowie niecierpliwie czekają na wyniki, aby się przekonać, czy te obserwacje mogą otworzyć nowe okno na wczesny Wszechświat.

W pierwszej połowie XX wieku wśród astronomów zajmujących się kosmologią najbliższy prawdy o współczesnym Wszechświecie był Georges Lemaître. W 1931 roku zaproponował model, w którym Wszechświat powstał w Wielkim Wybuchu, następnie rozszerzał się podobnie jak w modelu Friedmanna, aż osiągnął fazę stagnacji, w której stała kosmologiczna niemal dokładnie równoważyła gęstość materii, naśladując przez chwilę statyczny model Einsteina, po czym zaczął się ponownie rozszerzać, gdy stała kosmologiczna zaczęła dominować nad coraz rzadszą materią. Diagram czasoprzestrzenny dla tego modelu stanowi złożenie trzech modeli i wygląda jak dolna połowa piłki futbolowej (faza Friedmanna), na którą nałożony jest cylinder (statyczna faza Einsteina), a następnie poszerzona czara trąbki (faza przestrzeni de Sittera). Nie licząc fazy stagnacji w środku, Lemaître miał rację. Lemaître pierwszy obliczył tempo ekspansji Wszechświata, wykorzystując pomiary odległości galaktyk wykonane przez Hubble'a oraz pomiary przesunięć ku czerwieni Sliphera. Lemaître — także pierwszy — zasugerował, że stała kosmologiczna Einsteina może być traktowana jako stan próżni z dodatnią gęstością energii i ujemnym ciśnieniem. Całkiem nieźle jak na jedną karierę!

Inflacja jest bardzo skuteczna w wyjaśnianiu struktury obserwowanego przez nas Wszechświata. Nie wiemy, jak się zaczęła, ponieważ inflacja „zapomina" swoje początkowe warunki, gdy Wszechświat eksponencjalnie się rozszerza, wymazując wszelkie początkowe elementy. Istnieją jednak pewne spekulatywne hipotezy na temat początków inflacji.

Inflacja może się zacząć od maleńkiej „talii” — wszechświata 3-sfery de Sittera o obwodzie na przykład 3×10^{-27} centymetra, który następnie zaczyna się rozszerzać. Ale skąd to się wzięło? Alex Vilenkin sądził, że ten wszechświat mógł powstać dzięki kwantowemu tunelowaniu w procesie analogicznym do tego, w którym powstają wszechświaty bąbelkowe. W tym przypadku piłka spoczywająca w górskiej dolinie odpowiadałaby wszechświatowi 3-sfery o zerowych rozmiarach. Następnie przetunelowałaby przez górę i nagle znalazłaby się na zewnątrz na zboczu. To odpowiadałoby wszechświatowi 3-sfery o skończonych rozmiarach — talii de Sittera. Następnie staczałaby się ze zbocza, co odpowiadałoby lejkowi de Sittera. Jak wyglądałby diagram czasoprzestrzenny dla takiego wszechświata?



ILUSTRACJA 23.6. Diagram czasoprzestrzenny wszechświata, który tunelował z niczego

Credit: J. Richard Gott, *Time Travel in Einstein's Universe*, Houghton Mifflin, 2001

Vilenkin pokazał, że diagram wygląda jak lotka do gry w badmintona (il. 23.6). Punkt na czubku lotki (u dołu ilustracji) odpowiada początkowemu wszechświatowi o zerowych rozmiarach. Pierzasty, rozszerzający się ku górze klosz lotki reprezentuje ekspansję wszechświata de Sittera. Między punktem na czubku i kloszem znajduje się czarna, półsferyczna baza lotki, która reprezentuje fazę tunelowania przez zbocze góry. W trakcie tunelowania — dopóki wszechświat znajduje się „pod ziemią” — następuje zmiana znaku przy współrzędnej czasowej — czas staje się kolejną współrzędną przestrzenną. Półsferyczna baza lotki staje się połową 4-sfery z czterema współrzędnymi przestrzennymi i bez współrzędnej czasowej. Żadne zegary nie tykają w tym obszarze: tunelowanie zachodzi w jednym momencie. Piłka leży w dolinie... i nagle znajduje się na zboczu. James Hartle i Stephen Hawking rozważali taki model i sformułowali koncepcję, zgodnie z którą w tej półsferycznej części lotki punkt na czubku — biegun południowy — nie różni się od innych punktów na powierzchni bazy. Jest dokładnie taki jak biegun południowy na Ziemi, który także nie różni się od innych punktów na powierzchni Ziemi. U dołu lotki ten wszechświat nie ma granicy, co Hawking nazwał warunkiem braku granic (ang. *no boundary condition*). W ujęciu Hawkinga w tym wczesnym obszarze czas jest urojony. Liczba urojona *i* jest pierwiastkiem kwadratowym z liczby -1. Gdyby w normalnym interwale

czasoprzestrzennym, $\Delta s^2 = -\Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$, czas był urojony, czyli byłby równy *it* (ponieważ $i^2 = -1$), to człon $-\Delta(it)^2$ stałby się równy $+\Delta t^2$, i mielibyśmy $\Delta s^2 = \Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$. „Czas urojony" to brzmi trochę groźnie, ale w rzeczywistości oznacza tylko tyle, że czas staje się kolejną, zwykłą współrzędną przestrzenną. Mielibyśmy w tym obszarze cztery współrzędne przestrzenne, zamiast trzech współrzędnych przestrzennych i jednej współrzędnej czasowej.

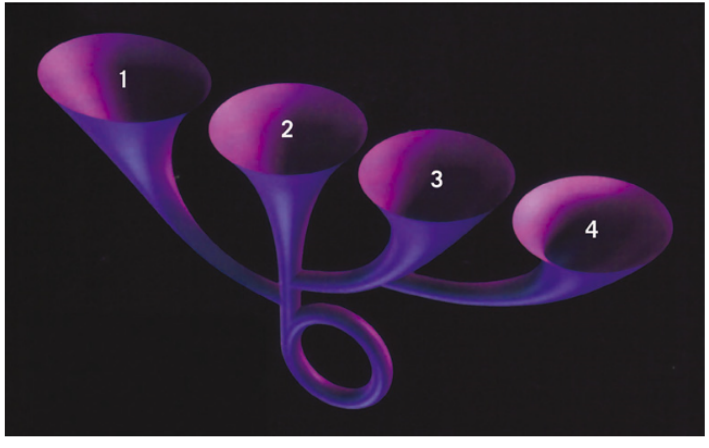
Tunelowanie kwantowe niewątpliwie jest dziwnym zjawiskiem. Szukamy czegoś dziwnego, co mogło się zdarzyć na początku Wszechświata, ponieważ początek Wszechświata niewątpliwie był dziwnym wydarzeniem. Może to i było tunelowanie kwantowe, ale — co jeszcze bardziej dziwne — Wszechświat powstał z niczego. Powstał z kwantowego stanu odpowiadającemu wszechświatowi o zerowych rozmiarach, który jednak zna wszystkie prawa fizyki i mechaniki kwantowej. Na jakiej zasadzie „nic" może znać prawa fizyki? Prawa fizyki to są reguły, które regulują zachowanie „rzeczy" (wszelkich tworów materialnych — cząstek, promieniowania, pól); jeżeli nie ma rzeczy, to co regulują prawa fizyki? To tylko jeden z problemów, które pojawiają się, gdy próbujemy zrobić wszechświat z niczego.

W międzyczasie Andrei Linde zwrócił uwagę, że wszechświat w fazie inflacji może w wyniku fluktuacji kwantowej wygenerować drugi wszechświat w fazie inflacji. Z trąbki de Sittera może wykiełkować druga trąbka, jak boczna gałązka na pniu drzewa. W wyniku inflacji ta boczna gałązka urośnie i będzie tak duża jak sam pień i może wypuścić własne gałązki. Gałązki będą wypuszczać kolejne gałązki, tworząc nieskończone, fraktalne drzewo wszechświatów pochodzących z pierwotnego pnia. Każda gałązka jest lejkiem, w którym mogą powstawać wszechświaty bąbelkowe (jak na il. 23.3). Moglibyśmy mieszkać w takim bąbelkowym wszechświecie w jednej z gałęzi, ale nadal pozostaje pytanie, skąd się wziął pień drzewa?

Li-Xin Li i ja próbowaliśmy znaleźć odpowiedź na to pytanie. Zaproponowaliśmy wersję, w której jedna z gałęzi zawróciła w czasie, urosła i stała się pniem. Nasz model można zobaczyć na ilustracji 23.7. W górnej części ilustracji widzimy cztery lejki — wszechświaty de Sittera w trakcie inflacji, oznaczone cyframi 1, 2, 3 i 4, od lewej do prawej. Wszechświat 2 spłodził wszechświat 1. Wszechświat 2 spłodził wszechświat 3. Wszechświat 3 spłodził wszechświat 4. Wszechświat 4 jest wnukiem wszechświata 2. Te gałęzie będą się nadal rozrastać i będą z nich pączkować kolejne gałązki, *ad infinitum*. Lejki nie zderzają się — wyobraź sobie, że mijają się w przestrzeni o większej liczbie wymiarów. Na tym diagramie — tak jak na poprzednich diagramach czasoprzestrzennych — tylko powierzchnia lejków jest realna.

A teraz niespodzianka: wszechświat 2 spłodził także gałązkę, która zawróciła w czasie i urosła do rozmiarów pnia. Powstała mała pętla czasowa, która wygląda jak litera „b". Wszechświat 2 jest swoim własnym ojcem! Jak już wyjaśniliśmy, ogólna teoria względności dopuszcza pętle w czasoprzestrzeni. W tym modelu nie ma krzywizny w osobliwości. Udało nam się znaleźć dla tego wszechświata stan kwantowej próżni, który jest samouzgodniony i stabilny. Pętla czasu ma horyzont Cauchy'ego wyznaczający granicę, na której

podróż w czasie się kończy. Jest to cięcie pod kątem 45^0, tuż powyżej miejsca, gdzie gałąź oddziela się od pnia. Możesz okrążać pętlę w dolnej części litery „b” tyle razy, ile masz ochotę, ale gdy miniesz gałąź i wkroczysz do górnego fragmentu litery „b”, nie masz odwrotu. Jeżeli jesteś przed horyzontem Cauchy’ego, możesz powrócić w czasie na kolejne okrążenie pętli, aby odwiedzić swoje wcielenie w przeszłości, ale gdy raz przekroczysz horyzont Cauchy’ego, znajdziesz się poza punktem rozgałęzienia i będziesz musiał podążać w górę do jednego z lejków. Ten wszechświat ma na początku mały wehikuł czasu, który się wyłącza. Co ciekawe, wyjście z takiego wehikułu czasu jest stabilne, co zresztą powoduje, że zbudowanie go na początku wszechświata jest łatwiejsze.



ILUSTRACJA 23.7. Samostwarzający się wieloświat Gotta i Li. Pętla u dołu reprezentuje wehikuł czasu; wszechświat płodzi sam siebie

Photo credit: J. Richard Gott, Robert J. Vanderbei, *Sizing Up the Universe*, „National Geographic”, 2011

To interesujące rozwiązanie, ponieważ wehikuł czasu znajduje się na początku wszechświata, dokładnie tam, gdzie jest potrzebny, aby rozwiązać problem pierwszej przyczyny. Dla każdego zdarzenia w tym wszechświecie istnieją zdarzenia, które go poprzedzają. Jeżeli jesteś gdzieś w pętli czasu, zawsze istnieją zdarzenia — w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara — które zdarzyły się wcześniej i poprzedzają cię w zwykłym sensie. Ten wieloświat jest skończony w przeszłości, ale nie ma najwcześniejszego zdarzenia.

Wydaje się, że ten teoretyczny model dobrze wpasowuje się do teorii superstrun. Teoria superstrun lub M-teoria postuluje jedenastowymiarową czasoprzestrzeń, na którą składa się jeden wymiar czasowy, trzy wymiary przestrzenne oraz siedem dodatkowych wymiarów przestrzennych, które są zwinięte i mikroskopowe, jak chcieliby Kaluza i Klein. Złożony kształt mikroskopowych wymiarów determinuje prawa fizyki. Co ciekawe, inflacja sugeruje, że trzy makroskopowe wymiary przestrzenne, które obserwujemy dzisiaj, początkowo były równie małe jak mikroskopowe wymiary Kaluzy i Kleina — talia de Sittera miała zapewne 3×10^{-27} centymetra. Ten mikroskopowy obwód wszechświata de Sittera uległ powiększeniu w wyniku inflacji. Początkowo było dziesięć zwiniętych, mikroskopowych wymiarów

przestrzennych; siedem z nich zostało zwiniętych jako mikroskopowe wymiary, natomiast trzy pozostałe uległy powiększeniu. W naszym (Gott-Li) modelu postulujemy, że czas był także zwinięty w mikroskopową pętlę czasową. Pętla czasowa mogła mieć krótki obwód w czasie (mierzony wzdłuż pętli w kierunku ruchu wskazówek zegara), gdzieś między 5×10^{-44} i 10^{-37} sekundy, jeżeli wszechświat był w odpowiednio samouzgodnionym stanie próżni kwantowej, który postulujemy. W pętli czasowej wszystkie dziesięć wymiarów przestrzennych oraz wymiar czasowy są zwinięte i mikroskopowe.

Jedna z cudownych cech inflacji polega na tym, że mały obszar próżni rozszerza się w fazie inflacji do dużej objętości, w której każdy mały fragment wygląda tak samo jak obszar, od którego wszystko się zaczęło. Jeżeli jeden z tych małych fragmentów jest akurat obszarem, od którego wystartowałeś, to masz pętlę czasową. Zatem w naszej teorii wszechświat nie powstaje z niczego, lecz powstaje z czegoś, z małego fragmentu samego siebie. W tym sensie wszechświat może być swoim własnym ojcem. Podróż w czasie jest czymś niezwykłym, lecz wydaje się, że w ogólnej teorii względności jest dozwolona; może jest właśnie tym, czego potrzebujemy, aby wyjaśnić, jak zaczął się Wszechświat.

Dzisiaj wydaje się, że teoria inflacji ma się całkiem nieźle. Potrafi bardzo szczegółowo wyjaśnić CMB (przypomnij sobie il. 15.3). Jeżeli masz wątpliwości, czy inflacja się zdarzyła, zwróć uwagę, że także obecnie obserwujemy lekką fazę inflacji. Ekspansja Wszechświata przyspiesza, najprawdopodobniej pod wpływem energii próżni (ciemnej energii) o niskiej gęstości, równej $6{,}9 \times 10^{-30}$ grama na centymetr sześcienny. Inflacja wymaga dużej ilości energii we wczesnym Wszechświecie. Inflacja produkuje wieloświat wszechświatów, co wydaje się nieuniknione. Jak bardzo naukowcy są pewni tego? Sir Martin Rees (astronom królewski) został kiedyś na konferencji zapytany, jak bardzo jest przekonany, że żyjemy w wieloświecie. Odpowiedział, że nie postawiłby na hipotezę wieloświata swojego życia, ale posunąłby się tak daleko, że postawiłby życie swojego psa. Linde wstał, aby powiedzieć, że spędził dziesiątki lat swojego życia, pracując nad ideą wieloświata, więc udowodnił, że postawiłby na nią własne życie. Steven Weinberg, laureat nagrody Nobla, stwierdził, że jest skłonny postawić na ideę wieloświata życie Lindego oraz życie psa Martina Reesa![11]

Jak zaczęła się inflacja? Nie wiemy. Czy pojawiła się z niczego w wyniku kwantowego tunelowania (zapewne najbardziej popularny model) lub — w jeszcze dziwniejszej wersji — czy na początku była mała pętla czasu? Pedro Gonzáles-Díaz zasugerował, że gdy odkryjemy prawdziwą teorię kwantowej grawitacji, może się okazać, że te dwa modele są w istocie jednym i tym samym modelem. Według innej spekulatywnej hipotezy, której autorami są Paul Steinhardt i Neil Turok, Wielki Wybuch nastąpił, gdy zderzyły się dwa wszechświaty unoszące się w jedenastowymiarowej czasoprzestrzeni, raptownie się rozgrzewając. Wielokrotne wielkie wybuchy mogły się zdarzać. (to mogło wyglądać jak dwie kartki papieru reprezentujące dwie flatlandie (dwa dwuwymiarowe wszechświaty) uderzające o siebie w trójwymiarowej przestrzeni. Takie rzeczy mogą się w zasadzie zdarzać w M-teorii. Lee Smolin

uważa, że nasz Wszechświat mógł powstać wewnątrz czarnej dziury w poprzednim wszechświecie. Gdy gwiazda się zapadała, tworząc czarną dziurę, gęstość jej wnętrza rosła i rosła, aż pojawił się stan próżni o wysokiej gęstości, którego grawitacyjna, odpychająca natura spowodowała, że odbił się w talii de Sittera i wyprodukował rozszerzający się stan inflacyjny, który mógł spłodzić wieloświat, jak zauważyli Claude Barrabès i Valeri Frolov. Wszystko to miałoby się zdarzyć w powstającej czarnej dziurze, gdy uśmiechniętą osobliwość z diagramu Kruskala zastąpi początek fazy ekspansji de Sittera.

To tylko kilka spośród spekulatywnych idei, które fizycy rozważają, aby znaleźć odpowiedź na ostateczne pytanie, jak zaczął się Wszechświat. Wśród tych różnych wersji tunelowanie z nicości jest obecnie prawdopodobnie najbardziej popularnym modelem, ale po prostu nie wiemy, który z nich jest poprawny. Być może poznamy odpowiedź, gdy odkryjemy „teorię wszystkiego", która zunifikuje ogólną teorię względności i mechanikę kwantową oraz silne i słabe oddziaływania jądrowe i elektromagnetyzm, łącząc i wyjaśniając wszystkie prawa fizyki. Gdy będziemy mieli równania „teorii wszystkiego", zobaczymy, jakie kosmologiczne rozwiązania wynikają z równań. Dlatego studiujemy i uprawiamy fundamentalną fizykę, badamy cząstki elementarne i ich oddziaływania. Poszukujemy wskazówek, jak Wszechświat działa, a może nawet, jak powstał.

24 – Nasza przyszłość we Wszechświecie

J. Richard Gott

Ten rozdział jest o przyszłości Wszechświata. Umieścimy na osi czasu istotne zdarzenia w historii Wszechświata zarówno przeszłe, jak i przyszłe. To obejmie niezmiernie długie okresy sięgające w odległą przeszłość, ale też niezmiernie krótkie okresy we wczesnym Wszechświecie. Jaki jest najwcześniejszy czas, o którym możemy mówić we wczesnym Wszechświecie?

Aby odpowiedzieć na to pytanie, musimy najpierw odpowiedzieć na dwa pokrewne pytania: jaki jest najkrótszy czas, który potrafimy zmierzyć? Jaki jest najszybszy zegar, który potrafię sobie wyobrazić? Każdy zegar, nawet kwarcowy, musi mieć coś, co się rusza tam i z powrotem, jak wahadło w zegarze dziadka. Jeżeli chcę mieć najszybszy możliwy zegar, potrzebuję najszybszego wahadła. Czego mam użyć? Światła! To najszybszy obiekt, który mogę posłać tam i z powrotem. W istocie, wszystko, czego potrzebuję, to ten świetlny zegar z ilustracji 17.1, z dwoma lustrami i wiązką światła odbijającą się od nich tam i z powrotem. Co muszę zrobić, jeżeli chcę, żeby mój zegar tykał szybciej? Zbliżyć lustra. Im bliżej są lustra, tym szybciej zegar tyka. Ostatecznie będę miał w moim zegarze jeden foton odbijający się w górę i w dół.

Co się stanie, jeżeli mój zegar będzie bardzo mały? Będę miał problem. Przynajmniej jedna długość fali λ musi się zmieścić w moim zegarze. Jeżeli odległość luster w moim zegarze jest równa L, to najmniejsza możliwa wartość $L = \lambda$. Długość fali i częstotliwość fotonu wiąże równanie $\lambda = c/\nu$. Im

mniejsza długość fali, tym większa częstotliwość. Gdy zmniejszam rozmiar L mojego zegara, muszę zmniejszać długość fali fotonu λ, aby się zmieścił między lustrami, więc muszę zwiększać częstotliwość ν fotonu. Zwiększanie częstotliwości oznacza zwiększanie energii, ponieważ energia fotonu wynosi $E = h\nu$. Nie możemy przy tym zapomnieć o równaniu Einsteina $E = mc^2$. Energia fotonu odpowiada pewnej masie. Gdy zmniejszam mój zegar, energia fotonu rośnie, więc rośnie także masa zegara. W końcu masa zegara staje się tak duża, a jego rozmiar L staje się tak mały, że zegar wpada w swój własny promień Schwarzschilda i zamienia się w czarną dziurę! Jeżeli spróbuję zrobić zegar, który tyka zbyt szybko, zegar zapadnie się i utworzy czarną dziurę, gdy długość L zegara będzie równa około $1{,}6 \times 10^{-33}$ centymetra, i gdy będzie tykał co $5{,}4 \times 10^{-44}$ sekundy. Jest to tak zwany czas Plancka. To najkrótszy czas, który potrafimy zmierzyć. Długość $L = 1{,}6 \times 10^{-33}$ centymetra już spotkaliśmy, gdy mówiłem, że rozmiar osobliwości w centrum czarnej dziury Schwarzschilda nie jest dokładnie równy zeru — w rzeczywistości jest równy około $1{,}6 \times 10^{-33}$ centymetra, gdyż jest rozmyty przez efekty kwantowe. Jest to tak zwana długość Plancka. To najkrótsza odległość, jaką potrafimy zmierzyć. Gdy wyjaśniałem, że obwody tych dodatkowych wymiarów przestrzennych, przewidywanych przez teorię strun, mogą być równe około 10^{-33} centymetra, to także miałem na myśli długość Plancka.

Nie da się zmierzyć krótszego czasu niż czas Plancka. Długość tej małej pętli czasowej na początku Wszechświata, o której Li-Xin Li i ja mówiliśmy w kontekście pierwszej przyczyny (zob. rozdział 23), może być rzędu czasu Plancka. Jeżeli w zwykłej czasoprzestrzeni mierzysz odległość w skali $1{,}6 \times 10^{-33}$ centymetra, a czas w skali około 5×10^{-44} sekundy, to geometria czasoprzestrzeni staje się nieokreślona, zgodnie z zasadą nieoznaczoności. Czasoprzestrzeń widziana w tej skali stanie się podobna do gąbki[12] — zwielokrotni się liczba połączeń. Wartość długości Plancka można wyrazić przez stałe fundamentalne, $L_{\text{Planck}} = (Gh/2\pi c^3)^{1/2} = 1{,}6 \times 10^{-33}$ centymetra. Widzimy tu wszystkich naszych starych przyjaciół: stałą grawitacji Newtona G, użytą do obliczenia promienia Schwarzschilda czarnej dziury; stałą Plancka h, użytą do obliczenia energii fotonu $E = h\nu$; oraz prędkość światła c, użytą do obliczenia ekwiwalentu masy dla energii fotonu ($E = mc^2$). Czas Plancka, $T_{\text{Planck}} = L_{\text{Planck}}/c$, jest równy tyle, ile potrzebuje światło, aby przebyć długość Plancka. Pomijając czynniki rzędu 2 lub π, jest to minimalny rozmiar zegara, zanim się zapadnie i stanie się czarną dziurą. Masa tego najmniejszego, najszybszego zegara jest równa masie Plancka, czyli $2{,}2 \times 10^{-5}$ grama, natomiast gęstość masy tego zegara jest równa gęstości Plancka, czyli 5×10^{93} grama na centymetr sześcienny. Tego rzędu gęstości możesz się spodziewać w osobliwości w czarnej dziurze, zanim mechanika kwantowa ją rozmyje. W przypadku zjawisk zachodzących w skali Plancka mechanika kwantowa zaczyna odgrywać rolę w ogólnej teorii względności[13], a — jak już wspomniałem — nie mamy jeszcze zunifikowanego modelu kwantowej grawitacji. Skala Plancka (długość lub czas) stanowi zatem granicę, poza którą nie potrafimy wyjść z opisem i zrozumieniem rzeczywistości.

Czas Plancka, 5×10^{-44} sekundy, to najkrótszy czas, jaki można zmierzyć, i najwcześniejszy czas, o jakim możemy mówić we Wszechświecie. Jak już mówiłem, nasz Wszechświat może być tylko jednym bąbelkiem (lub plamką) w jednym inflacyjnym lejku tworzącym jedną gałąź w nieskończonym, fraktalnym drzewie wszechświatów tworzącym wieloświat, który może być dowolnie stary. Ale liczę czas od momentu, gdy powstał nasz mały bąbelek. Tabela 24.1 pokazuje, co się dzieje w poszczególnych epokach.

Gdy kończy się inflacja, mniej więcej w 10^{-35} sekundy, stan próżni, który wypełniał wczesny Wszechświat ciemną energią o wysokiej gęstości, rozpada się na promieniowanie termiczne. To promieniowanie jest bardzo gorące i zawiera nie tylko fotony (nośniki siły elektromagnetycznej), ale także kwarki, antykwarki, elektrony, pozytony, miony, antymiony, taony (cząstki tau — cięższe odpowiedniki mionów), antytaony, neutrina, antyneutrina, gluony (nośniki silnego oddziaływania jądrowego), bozony X (hipotetyczne cząstki przewidywane przez niektóre teorie, których asymetryczny rozpad spowodował nadwyżkę materii nad antymaterią w widocznym dzisiaj Wszechświecie), cząstki W oraz Z (nośniki słabego oddziaływania jądrowego), bozony Higgsa (cząstki związane z polem Higgsa, które nadaje cząstkom ich masę) oraz grawitony (nośniki pola grawitacyjnego, podobnie jak foton jest nośnikiem pola elektromagnetycznego). A jeżeli teoria supersymetrii jest poprawna, będą tam także supersymetryczni partnerzy wszystkich powyższych cząstek.

TABELA 24.1. Epoki Wszechświata

Czas od początku	Co się zdarzyło
5×10^{-44} sekundy	czas Plancka
10^{-35} sekundy	koniec inflacji; losowe fluktuacje kwantowe tworzą zalążki galaktyk; powstaje materia; zupa kwarkowa
10^{-6} sekundy	kwarki kondensują w protony i neutrony
3 minuty	synteza helu; powstają lekkie pierwiastki
380 tysięcy lat	rekombinacja; elektrony i protony łączą się, tworząc atomy wodoru; mikrofalowe promieniowanie tła
1 miliard lat	powstawanie galaktyk
10 miliardów lat	powstaje życie na Ziemi
13,8 miliarda lat	jesteśmy tutaj
22 miliardy lat	Słońce kończy swoje życie na ciągu głównym i staje się białym karłem
850 miliardów lat	Wszechświat ochłodził się do temperatury Gibbonsa i Hawkinga
10^{14} lat	gwiazdy gasną; ostatnie czerwone karły giną
10^{17} lat	planety są wyrzucane z orbit; spotkania gwiazd unicestwiają układy planetarne białych karłów i gwiazd neutronowych
10^{21} lat	powstają czarne dziury o galaktycznej masie; ucieka większość gwiazd i planet
10^{64} lat	protony powinny były się już rozpaść; pozostały czarne dziury, elektrony i pozytony, fotony, neutrina

	i grawitony
10^{100} lat	czarne dziury o galaktycznej masie wyparowują

Słówko o grawitonach. Einstein odkrył, że fale grawitacyjne, zmarszczki w geometrii czasoprzestrzeni, które podróżują w pustej przestrzeni z prędkością światła, są rozwiązaniem równań pola w ogólnej teorii względności. Wcześniej Maxwell odkrył, że fale elektromagnetyczne, które podróżują w pustej przestrzeni z prędkością światła, są rozwiązaniem równań pola w teorii elektromagnetyzmu. Mamy pośrednie dowody na istnienie fal grawitacyjnych (których nośnikiem byłby grawiton) w postaci obserwacji podwójnego pulsara (wykonanych przez Taylora i Hulse'a), którego orbita staje się stopniowo coraz ciaśniejsza, dokładnie tak, jak przewiduje teoria Einsteina, gdy krążące wokół siebie dwie gwiazdy neutronowe emitują fale grawitacyjne. 14 września 2015 roku eksperyment LIGO dokonał pierwszej bezpośredniej detekcji fal grawitacyjnych. Laserowy interferometr, mierzący z ekstremalną dokładnością (1/1000 średnicy protonu) odległość dwóch luster, zarejestrował maleńkie oscylacje odległości luster, gdy fale grawitacyjne przeniknęły przez interferometr. To piękny zbieg okoliczności, że przewidziane przez Einsteina fale grawitacyjne zostały ostatecznie wykryte przy użyciu laserów, ponieważ Einstein odkrył także zasadę działania lasera. Źródłem tych fal grawitacyjnych była czarna dziura o masie 29 mas Słońca oraz czarna dziura o masie 36 mas Słońca, które krążyły wokół siebie na coraz ciaśniejszej orbicie w układzie podwójnym, aż się zderzyły i utworzyły pojedynczą czarną dziurę o masie 62 mas Słońca. Zatem fale grawitacyjne istnieją, a rezultat jest spójny z koncepcją, według której nośnikiem tych fal są grawitony poruszające się z prędkością światła[14]. Grawitacja jest bardzo słabą siłą, więc nie zarejestrowaliśmy jeszcze pojedynczych grawitonów, lecz przypuszczamy, że istnieją, ponieważ zarejestrowaliśmy fale grawitacyjne, i spodziewamy się, że dualizm korpuskularno-falowy dotyczy także grawitonów, podobnie jak dotyczy fal elektromagnetycznych i fotonów.

Epokę, w której kłębią się wszystkie te cząstki elementarne, nazywamy zupą kwarkową. Kwarki poruszają się swobodnie i nie są uwięzione w ciasnych trójkach. Ze względu na zasadę nieoznaczoności w niektórych obszarach kwantowy stan próżni rozpada się nieco później, a w innych obszarach rozpada się nieco wcześniej, wywołując losowe fluktuacje gęstości promieniowania termicznego, które powstaje, gdy kwantowy stan próżni się rozpada.

Fluktuacje gęstości są obecne w 10^{-35} sekundy, gdy kończy się inflacja. Tworzą zalążki, które ostatecznie — w wyniku działania grawitacji przez 13,8 miliarda lat — doprowadzą do powstania galaktyk i wielkich gromad galaktyk, które obecnie obserwujemy. Grupowanie galaktyk w układy przypominające gąbkę, które obecnie obserwujemy (il. 15.4), gdzie wielkie gromady galaktyk — połączone przez włókna (lub łańcuchy) galaktyk, nazywane kosmiczną pajęczyną — reprezentują (powiększone do ogromnych rozmiarów) utrwalone przez upływ czasu pozostałości owych wczesnych, kwantowych fluktuacji, które powstały, gdy Wszechświat miał tylko 10^{-35} sekundy[15]!

Gdy Wszechświat się rozszerza, ta gorąca zupa się ochładza i masywne cząstki rozpadają się na lżejsze. Początkowo Wszechświat zawierał równą ilość materii i antymaterii, lecz wydaje się, że asymetryczne rozpady ciężkich bozonów X, faworyzujące materię względem antymaterii, doprowadziły do niewielkiej nadwyżki materii nad antymaterią w produktach rozpadu. Gdy cząstki materii i antymaterii zderzają się i anihilują w jednakowej ilości, produkując fotony, nadwyżka materii pozostaje. Galaktyki, które obecnie obserwujemy, są zbudowane z materii. Cząstki antymaterii są aktualnie rzadkością we Wszechświecie i nieustannie grozi im spotkanie z przedstawicielami materii kończące się anihilacją. Cząstki materii mają dzisiaj ogromną przewagę liczebną nad cząstkami antymaterii.

W 10^{-6} sekundy promieniowanie stało się tak chłodne, że kwarki połączyły się w protony i neutrony. Istnieje sześć zapachów kwarków (zamiast „rodzaj" fizycy używają określenia „zapach", od ang. *flavor*): górny u (*up*), dolny d (*down*), dziwny s (*strange*), powabny c (*charm*), piękny/niski/denny b (*beauty/bottom*), prawdziwy/wysoki/szczytowy t (*truth/top*)[16]. Kwarki górny i dolny są najlżejsze. Proton tworzą dwa kwarki górne i jeden dolny; wiąże je oddziaływanie przenoszone przez gluony. Neutron tworzą dwa kwarki dolne i jeden górny; neutrony także wiąże oddziaływanie przenoszone przez gluony (prosty sposób, aby to zapamiętać: proton ma więcej kwarków górnych, które w nazwie (*up*) mają literę „p" jak proton; neutron ma więcej kwarków dolnych, które w nazwie (*down*) mają literę „n" jak neutron. Kwark górny ma ładunek elektryczny +2/3, natomiast kwark dolny ma ładunek elektryczny -1/3. W rezultacie proton ma ładunek elektryczny równy +1, a neutron ma ładunek elektryczny równy 0.

W trzeciej minucie zachodzi[17] synteza helu, jak opisaliśmy w rozdziale 15. Wszechświat ochłodził się na tyle, że protony i neutrony mogą się łączyć, tworząc jądra lekkich pierwiastków. Najbardziej rozpowszechnionym pierwiastkiem jest wodór (proton), ale powstaje także znaczna ilość jąder helu oraz niewielkie ilości deuteru i litu. Tę epokę rozważali Gamow i jego studenci, gdy przewidzieli istnienie CMB.

Po 380 tysiącach lat Wszechświat ochłodził się do około 3000 K. W tym momencie elektrony mogą się wiązać z protonami, tworząc atomy wodoru[18]. Ten proces, jak już mówiliśmy, nazywamy rekombinacją. Wypełniająca Wszechświat plazma (w większości elektrycznie naładowanych) cząstek — protonów (+) i elektronów (-) — zamienia się w elektrycznie neutralny gaz, złożony głównie z wodoru, gdyż każdy proton schwytał jeden elektron, tworząc elektrycznie neutralny atom wodoru. We wcześniejszej epoce fotony były nieustannie rozpraszane przez elektrycznie naładowane cząstki — protony lub elektrony — poruszając się w sposób, który określamy terminem „błądzenie losowe" (ang. *drunken walk*). Fotony nie mogły podróżować na dużą odległość, ponieważ były nieustannie rozpraszane. Po fazie rekombinacji fotony mogły już podróżować bez przeszkód, wzdłuż linii prostych, na duże odległości. Dzięki temu możemy teraz bezpośrednio widzieć tę epokę, gdy rejestrujemy promieniowanie CMB.

Po miliardzie lat zaczynają się tworzyć galaktyki. Kwazary o dużym przesunięciu ku czerwieni, omawiane w rozdziale 16, pochodzą od galaktyk, które powstały nieco wcześniej.

Dzisiaj Wszechświat ma 13,8 miliarda lat.

Upływają 22 miliardy lat. Słońce kończy swoje życie na ciągu głównym i staje się białym karłem. Galaktyka Andromedy zderza się z Drogą Mleczną.

Po około 850 miliardach lat Wszechświat ochłodzi się do stałej temperatury w wyniku procesu opisanego przez Gibbonsa i Hawkinga. Jak opisałem w rozdziale 23, obserwacje sugerują, że Wszechświat jest wypełniony przez ciemną energię. Gęstość ciemnej energii jest równa co do wartości jej ujemnemu ciśnieniu (dynamicznie równoważnemu stałej kosmologicznej Einsteina). W odległej przyszłości Wszechświat będzie coraz bardziej zdominowany przez ciemną energię, ponieważ gęstość zwykłej materii Wszechświata stopniowo się zmniejsza na skutek ekspansji, natomiast gęstość ciemnej energii pozostaje stała. Geometria Wszechświata w przyszłości powinna zatem przypominać przestrzeń de Sittera — czasoprzestrzenny lejek, który będzie się rozszerzać w nieskończoność. Dwie galaktyki, które dzisiaj mogą się komunikować, będą się coraz szybciej oddalać. W końcu przestrzeń między dwiema galaktykami będzie się tak szybko rozszerzać, że światło nie zdoła pokonać wzrastającej odległości między nimi. Powstaną horyzonty zdarzeń. Odległa galaktyka będzie wyglądać, jakby wpadała do czarnej dziury. Będzie coraz bardziej czerwona. Jeżeli jej mieszkańcy wyślą sygnał „SPRAWY MAJĄ SIĘ OK”, do nas dotrze „SPRAWY M ... ... A ... ... J ... ... Ą”. Nigdy nie zobaczymy reszty sygnału, „SIĘ OK”. Zdarzenia, które w odległej galaktyce nastąpią później, będą poza naszym horyzontem zdarzeń i nigdy ich nie zobaczymy (por. il. 23.2).

Hawking udowodnił, że na horyzontach zdarzeń powstaje promieniowanie Hawkinga. Gibbons i Hawking obliczyli, że w przestrzeni de Sittera w późnym okresie obserwatorzy będą widzieć promieniowanie termiczne, nazwane promieniowaniem Gibbonsa i Hawkinga. To promieniowanie termiczne, obecne w przyszłości w naszym Wszechświecie, będzie miało charakterystyczną długość fali λ_{max}, równą około 22 miliardom lat świetlnych. Długość fali promieniowania CMB zwiększa się, w miarę jak Wszechświat się eksponencjalnie rozszerza, podwajając swoje rozmiary co 12,2 miliarda lat. Po 850 miliardach lat charakterystyczna długość fali termicznego promieniowania CMB będzie większa niż 22 miliardy lat świetlnych; CMB stanie się wtedy nieistotne w porównaniu z promieniowaniem Gibbonsa i Hawkinga emitowanym przez horyzonty zdarzeń. Temperatura Wszechświata przestanie się wtedy zmniejszać i ustabilizuje się na temperaturze Gibbonsa i Hawkinga, równej około 7×10^{-31} kelwina. To dość zimno, ale wciąż powyżej zera.

Te koncepcje są testowalne. Promieniowanie Gibbonsa i Hawkinga jest także produkowane we wczesnej inflacyjnej fazie Wszechświata zarówno w postaci promieniowania elektromagnetycznego, jak i promieniowania grawitacyjnego. Jeżeli takie grawitacyjne promieniowanie wczesnego Wszechświata zostanie ostatecznie wykryte — w formie rotacji polaryzacji

CMB, jak opisałem w rozdziale 23 — moim zdaniem będzie to ważna, eksperymentalna weryfikacja mechanizmu promieniowania Hawkinga. Źródłem grawitacyjnego promieniowania wczesnego Wszechświata nie są poruszające się masywne ciała, tak jak w przypadku fal grawitacyjnych zarejestrowanych przez LIGO, lecz zupełnie inny mechanizm — kwantowy proces Hawkinga. To będzie coś nowego i bardzo ciekawego.

Promieniowanie Gibbonsa i Hawkinga, którego spodziewamy się w odległej przyszłości, jest szkodliwe dla inteligentnych form życia. Freeman Dyson wykazał kiedyś, że inteligentne życie może istnieć nieskończenie długo, mając skończone rezerwy energii, ale pod warunkiem, że będzie mogło deponować ciepło odpadowe w chłodnicy. Jeżeli w kinie wyświetlam film, w temperaturze 300 kelwinów, a projektor emituje fotony w widzialnym zakresie widma, to cały seans wymaga pewnej ilości energii. Przypuśćmy jednak, że wszystko odbędzie się dwa razy wolniej. Zamiast widzialnych fotonów użyję fotonów podczerwonych o dwukrotnie większej długości fali. Seans będzie wymagał dwukrotnie mniejszej ilości energii, ale będzie trwał dwa razy dłużej (ponieważ fotony mają teraz dwukrotnie większą długość fali). Długość fali fotonów promieniowania termicznego w sali kinowej będzie także dwukrotnie większa, więc temperatura będzie równa 150 kelwinów, zamiast zwykłej 300 kelwinów. Inteligentne życie może oszczędzać energię, komunikując się i myśląc coraz W … O … L … N … I … E … J. Możesz nawet pomyśleć nieskończoną liczbę myśli, mając do dyspozycji skończoną ilość energii, jeżeli będziesz coraz wolniej myśleć. Jest to możliwe, ale pod warunkiem, że będziesz mógł deponować ciepło odpadowe (wszystkie procesy biologiczne, łącznie z procesami myślenia, generują ciepło) w coraz chłodniejszym mikrofalowym promieniowaniu tła, od czasu do czasu będziesz hibernował i funkcjonował w coraz niższej temperaturze. To będzie działać, dopóki temperatura CMB się obniża w kierunku absolutnego zera. Ale po 850 miliardach lat Wszechświat osiągnie stałą równowagową temperaturę, równą temperaturze Gibbonsa i Hawkinga, i od tego czasu temperatura Wszechświata pozostanie stała. Wtedy już nie będziemy mogli funkcjonować w niższej temperaturze, aby oszczędzać energię. Będzie potrzebne chłodzenie, ale lodówka bardzo szybko zużyje pozostałe zapasy energii. Co więcej, inne galaktyki uciekną poza horyzont zdarzeń, pozostawiając do naszej dyspozycji skończony zapas energii. Inteligentne życie wpadnie w kłopoty energetyczne i ostatecznie wymrze.

Nieco później pojawi się kolejny problem. Po upływie 10^{14} lat gwiazdy zaczną gasnąć. Ostatnie, długo żyjące gwiazdy o małej masie zużyją resztę wodorowego paliwa i wymrą. Zapadnie ciemność. Pozostaną tylko niedopałki — białe karły, gwiazdy neutronowe, czarne dziury. Niektóre z nich będą nadal mieć planety. Po upływie 10^{17} lat na skutek okazjonalnych spotkań gwiazd planety zostaną wyrwane z ich orbit i posłane w przestrzeń międzygwiezdną.

Po upływie 10^{21} lat utworzą się czarne dziury o galaktycznej masie. Niektóre gwiazdy zostaną wyrzucone (wystrzelone jak z procy) poza galaktyki przez dwuciałowe oddziaływania, a reszta wpadnie do centralnej czarnej

dziury. Promieniowanie grawitacyjne spowoduje, że wszystkie pobliskie gwiazdy spiralnym ruchem wpadną do czarnej dziury.

Po upływie 10^{64} lat (lub nieco wcześniej) protony się rozpadną na skutek procesu, w którym proton tuneluje do czarnej dziury o rozmiarach Plancka (w wyniku działania zasady nieoznaczoności), a czarna dziura szybko wyparowuje przez promieniowanie Hawkinga. Czarna dziura nie zachowuje liczby barionowej (liczby protonów i neutronów) — nie pamięta, czy wpadł do niej proton czy pozyton — lecz zachowuje ładunek elektryczny. Z tego powodu jednym z produktów rozpadu czarnej dziury, do której wpadł proton, może być pozyton (cząstka lżejsza od protonu). Gdy znikną wszystkie protony, pozostaną tylko pozytony i elektrony jako najbardziej masywne cząstki. Protony mogą się rozpadać znacznie wcześniej, być może w skali 10^{34} lat, ale tak czy owak znikną wszystkie za 10^{64} lat.

Po upływie 10^{100} lat czarne dziury o galaktycznej masie wyparują przez promieniowanie Hawkinga.

Co dalej? Fizycy sądzą, że ciemna energia, która dzisiaj powoduje eksponencjalną ekspansję Wszechświata, reprezentuje stan próżni ze stałą, dodatnią gęstością energii (oraz ujemnym ciśnieniem). Steven Weinberg porównuje naszą obecną sytuację do życia w dolinie, nieco powyżej poziomu morza — nasza wysokość odpowiada ilości ciemnej energii obecnej w próżni. Stoczyliśmy się na dno tej doliny i siedzimy tam nieruchomo. Ilość energii w próżni — ciemnej energii — nie zmienia się w czasie. Pozwoli to Wszechświatowi przez bardzo długi czas podwajać swoją objętość co 12,2 miliarda lat.

Jest dość prawdopodobne, że nasz stan próżni (z określoną gęstością ciemnej energii) mając wystarczająco dużo czasu, ulegnie kwantowemu tunelowaniu (przez zbocze doliny) do stanu o niższej energii (czyli do obszaru leżącego niżej od naszej doliny). To może spowodować, że bąbelek o niższej gęstości energii próżni powstanie gdzieś w widocznym obszarze naszego Wszechświata. Ujemne ciśnienie na zewnątrz bąbelka będzie bardziej ujemne niż ciśnienie wewnątrz, a różnica ciśnień pociągnie ściany na zewnątrz. Po krótkim czasie ściana bąbelka będzie się poruszać na zewnątrz z prędkością zbliżoną do prędkości światła. Bąbelek będzie się wiecznie rozszerzać. W środku bąbelka będą obowiązywać inne prawa fizyki. Jeżeli ściana tego bąbelka cię uderzy, to zginiesz.

Można obliczyć prawdopodobieństwo na jednostkę czasu, że zdarzy się kwantowe tunelowanie z doliny do obszaru leżącego niżej i na zewnątrz doliny. Możemy zaobserwować bąbelki o niższej gęstości energii próżni po czasie „zaledwie” 10^{138} lat, na skutek znanej niestabilności w próżni Higgsa[19]. Wielu fizyków uważa, że próżnia Higgsa jest stabilna dzięki efektom o wyższej energii. W takim przypadku według spekulatywnych obliczeń, które wykonał Andrei Linde, bąbelki o niższej gęstości energii próżni zaczną się pojawiać dopiero po czasie 10^(10^34) lat! Te bąbelki powstaną, ale — podobnie jak bąbelkowe wszechświaty na ilustracji 23.3 — nigdy nie wypełnią całej przestrzeni. rozszerzający się stan próżni — inflacyjne morze pokryte

bąbelkami — będzie nieustannie podwajał swoją objętość co 12,2 miliarda lat. W późniejszym okresie nasz Wszechświat będzie wyglądał jak wiecznie pieniący się szampan.

Znacznie mniej prawdopodobna, jak sugerują Linde i Vilenkin, byłaby kwantowa fluktuacja, w wyniku której cały widoczny Wszechświat przeskoczyłby do stanu o wyższej gęstości energii próżni i stworzył nowy, szybko rozszerzający się, inflacyjny wszechświat o wysokiej gęstości. To przypominałoby inflację o wysokiej gęstości, którą widzieliśmy na początku naszego Wszechświata, i zainicjowałoby nowy wieloświat. Może upłynąć 10^(10^120) lat, zanim to się zdarzy!

Według alternatywnego scenariusza w ogóle nie żyjemy w dolinie, lecz na zboczu, i powoli staczamy się na poziom morza. Bharat Ratra, Jim Peebles, Zack Slepian, ja i wielu innych badało ten scenariusz, w którym ciemna energia znika powoli, w skali miliardów lat, staczając się do stanu próżni o zerowej gęstości energii. Jest to tak zwana ciemna energia powolnego staczania (ang. *slow-roll dark energy*). Taki proces nastąpił już raz przed inflacją, gdy stan o bardzo wysokiej gęstości ciemnej energii stoczył się do stanu próżni o niskiej energii, który widzimy obecnie. To może się zdarzyć ponownie, ostatecznie prowadząc do poziomu morza — zerowej energii próżni. Te scenariusze można badać, mierząc szczegółowo historię ekspansji Wszechświata od początku do dzisiaj, co pozwala wyznaczyć stosunek ciśnienia do gęstości energii w ciemnej energii — wielkość *w*. Jeżeli *w* okaże się dokładnie równe -1, co stanowi dynamiczny ekwiwalent stałej kosmologicznej Einsteina, to faworyzowany będzie scenariusz „uwięzienia w dolinie", gęstość ciemnej energii pozostanie stała, a Wszechświat będzie nieustannie podwajał swoją objętość co 12,2 miliarda lat. Jeżeli jednak *w* okaże się mniej ujemne niż -1, to powoli stoczymy się do poziomu morza, a przyspieszająca ekspansja ostatecznie ustąpi liniowej ekspansji. Wszechświat będzie się wiecznie rozszerzał, ale w stałym (liniowym) tempie. W tym przypadku ekspansja postępuje w tempie 1, 2, 3, 4, 5, 6,... w funkcji czasu.

Robert Caldwell, Mark Kamionkowski i Nevin Weinberg sformułowali radykalną hipotezę, zgodnie z którą *w* może być bardziej ujemne niż -1. Jest to tak zwana energia fantomowa, która rośnie z czasem, w miarę jak Wszechświat się rozszerza, prowadząc do uciekającej ekspansji kończącej się osobliwością w przyszłości (ang. Big Rip — Wielkie Rozdarcie), która rozerwie galaktyki, gwiazdy i planety zaledwie za bilion lat. Taka „fantomowa" energia byłaby możliwa pod warunkiem, że energia kinetyczna w ruchu (staczaniu się ze zbocza) pola kontrolującego ciemną energię jest ujemna. Ten scenariusz wydaje się mało realny ze względu na fizyczne podstawy samej koncepcji fantomowej energii, a także z tego powodu, że ciemna energia, którą widzimy dzisiaj, byłaby zupełnie niepodobna do ciemnej energii obecnej w fazie inflacji. Wszystkie trzy scenariusze pozostają jednak otwarte, aczkolwiek ostatni wydaje mi się mniej prawdopodobny niż dwa pozostałe. Niemniej wielu fizyków całkiem poważnie traktuje koncepcję energii fantomowej [20].

Jak wspomniałem w rozdziale 23, najlepsze oszacowanie aktualnej wartości *w* (uzyskane przez zespół satelity Planck, na podstawie wszystkich

dostępnych danych, łącznie z danymi przeglądu Sloan Digital Sky Survey) wynosi $w_0 = -1{,}008 \pm 0{,}068$. Ten wynik jest zgodny, w granicach błędu pomiarowego, z wartością $w = -1$ (odpowiadającą stałej kosmologicznej Einsteina), reprezentującą model, w ramach którego siedzimy na dnie doliny. Wynik stanowi zarazem silny dowód na rzecz ogólnej idei, zgodnie z którą ciemna energia reprezentuje stan próżni z dodatnią energią i ujemnym ciśnieniem, lecz na podstawie dotychczasowych obserwacji nie jesteśmy jeszcze w stanie rozróżnić modeli, w ramach których siedzimy na dnie doliny, od modeli, w ramach których staczamy się (lub wspinamy) wzdłuż zbocza doliny. W dwóch ostatnich przypadkach wartość w_0 byłaby bliska (ale niedokładnie równa) -1; nieco powyżej lub poniżej. Jeżeli przyszłe, dokładne pomiary wykażą, że w jest bez wątpienia różne od -1, dowiemy się, czy faworyzują wersję ciemnej energii powolnego staczania czy energii fantomowej. Jeżeli jednak kolejne pomiary będą wciąż zgodne z wartością $w_0 = -1$ w granicach błędu pomiarowego, możemy równie dobrze ogłosić triumf modelu „uwięzienia w dolinie". Istnieje wiele eksperymentów w trakcie realizacji lub w trakcie przygotowań, które potencjalnie będą w stanie zmniejszyć niepewność pomiarową $w_0 = -1$ o rząd wielkości lub lepiej. Mamy nadzieję, że te eksperymenty wyjaśnią ostateczny los Wszechświata.

To wszystko, co przy obecnym stanie wiedzy możemy powiedzieć na temat ewolucji i losu Wszechświata w przyszłości. A co wiemy na temat naszej własnej przyszłości we Wszechświecie? Co będzie z nami? Jaki los czeka gatunek *Homo sapiens* w odległej przyszłości? Bardzo chcielibyśmy poznać odpowiedź na to pytanie.

Po pierwsze, chciałbym zwrócić uwagę, że żyjemy w epoce, która doskonale nadaje się do życia. Wszechświat ochłodził się na tyle, że nadaje się do zamieszkania; węgiel i inne niezbędne do życia pierwiastki miały dość czasu, aby powstać, gwiazdy pięknie świecą, dając ciepło i energię. Powinniśmy się spodziewać, że właśnie w tej epoce znajdziemy inteligentnych obserwatorów. Gdy gwiazdy zgasną, inteligentne życie będzie miało znacznie trudniejsze warunki. Jeżeli spojrzysz na tabelę 24.1, to przekonasz się, że znaleźliśmy się w epoce, która nadaje się do życia. Zgodnie ze słabą zasadą antropiczną, którą zaproponował Robert Dicke, a nieco później nazwał i precyzyjnie sformułował Brandon Carter, inteligentni obserwatorzy powinni oczywiście spodziewać się, że znajdują się w miejscu i w czasie, które nadają się do życia (nie zadaliby tego pytania w miejscu lub w czasie, które nie nadają się do życia!). W istocie znajdujemy się w samym środku czegoś, co wydaje się najlepszą do życia epoką we Wszechświecie.

Jako jedyni inteligentni obserwatorzy, których dotychczas znamy we Wszechświecie, chcielibyśmy wiedzieć, jak długo przetrwa nasz gatunek. Jak w ogóle podejść do tego pytania?

W 1969 roku odwiedziłem mur berliński, który oddzielał dwa sektory miasta należące do Niemiec Wschodnich i do Zachodnich. Ludzie zastanawiali się wtedy, jak długo mur berliński przetrwa. Niektórzy sądzili, że jest to

chwilowa aberracja, która szybko zniknie; inni uważali, że mur pozostanie trwałym artefaktem współczesnej Europy.



ILUSTRACJA 24.1. Rich Gott na tle muru berlińskiego w 1969 roku. Moja prawa stopa jest w Berlinie Wschodnim, moja lewa stopa jest w Berlinie Zachodnim, a mur berliński jest na wprost za moimi plecami

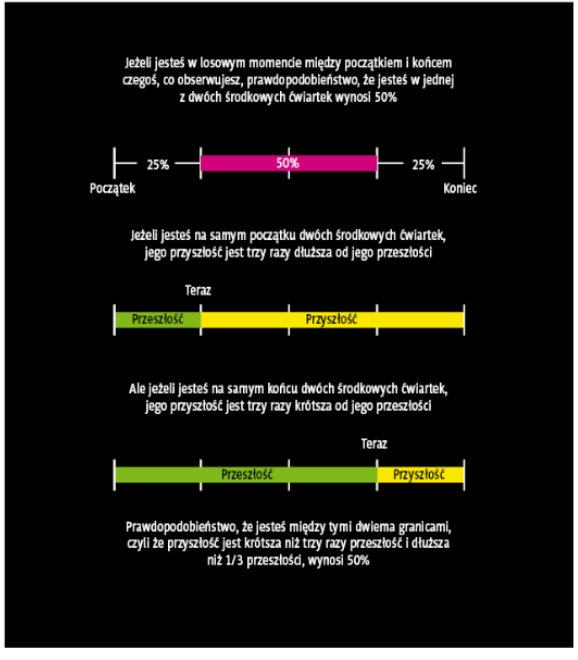
Photo credit: kolekcja J. Richarda Gotta

Ilustracja 24.1 pokazuje moje zdjęcie na tle muru berlińskiego w 1969 roku. Aby oszacować „długowieczność" muru, zastosowałem zasadę kopernikańską. Pamiętam mój tok myślenia: nie jestem wyjątkowy. Moja wizyta nie jest wyjątkowa. Ja tylko odwiedzam Europę — wtedy to była „Europa za 5 dolarów dziennie". Przychodzę obejrzeć mur berliński, ponieważ akurat jestem w Berlinie i tak się składa, że mur berliński jest w Berlinie. Mógłbym go zobaczyć w dowolnym momencie jego historii. Jeżeli moja wizyta nie jest wyjątkowa, to powinna się znajdować w jakimś losowym momencie między początkiem i końcem istnienia muru (koniec muru nastąpi wtedy, gdy zostanie spełniony dowolny z dwóch warunków: gdy mur zostanie zburzony lub gdy nie będzie już nikogo żywego, kto mógłby go zobaczyć). Prawdopodobieństwo, że moja wizyta nastąpiła gdzieś w środkowej połowie istnienia muru — czyli w jednej z dwóch środkowych ćwiartek — wynosi 50%. Gdybym trafił na początek tej środkowej połowy istnienia muru, to mur miałby za sobą 1/4 swojego istnienia i jeszcze 3/4 w przyszłości. W tym przypadku przyszłość muru byłaby trzy razy dłuższa od jego przeszłości. I przeciwnie, gdybym trafił na koniec środkowej połowy, mur miałby już za sobą 3/4 swojego istnienia i jeszcze tylko 1/4 w przyszłości. W tym przypadku przyszłość muru byłaby trzy razy krótsza od jego przeszłości.

W rezultacie uznałem, że prawdopodobieństwo, iż jestem między tymi dwiema granicami, czyli że przyszłość muru jest krótsza niż trzy razy przeszłość i dłuższa niż 1/3 przeszłości, wynosi 50% (il. 24.2). W momencie mojej wizyty mur miał osiem lat. Stojąc na murze, powiedziałem do kolegi, Chucka Allena, że mur postoi jeszcze co najmniej 2,66 roku, ale nie dłużej niż 24 lata.

Dwadzieścia lat później oglądam telewizję, dzwonię do kolegi i mówię: „Chuck, pamiętasz tę moją przepowiednię na temat muru berlińskiego? No to

włącz telewizor, ponieważ prezenter NBC, Tom Brokaw, stoi teraz na murze, który dzisiaj będzie zburzony!". Chuck pamiętał przepowiednię. Mur berliński został zburzony dwadzieścia lat później, wewnątrz przedziału od 2,66 roku do 24 lat, który przepowiedziałem. Moja wizyta odbyła się w środku zimnej wojny, więc bomba atomowa mogła załatwić mur (i mnie) w następnej milisekundzie. Dla odmiany niektóre słynne mury, na przykład Wielki Mur Chiński, przetrwały tysiące lat. Przewidywany przeze mnie zakres był całkiem wąski, lecz okazał się trafny.



ILUSTRACJA 24.2. Formuła kopernikańska (poziom ufności 50%)

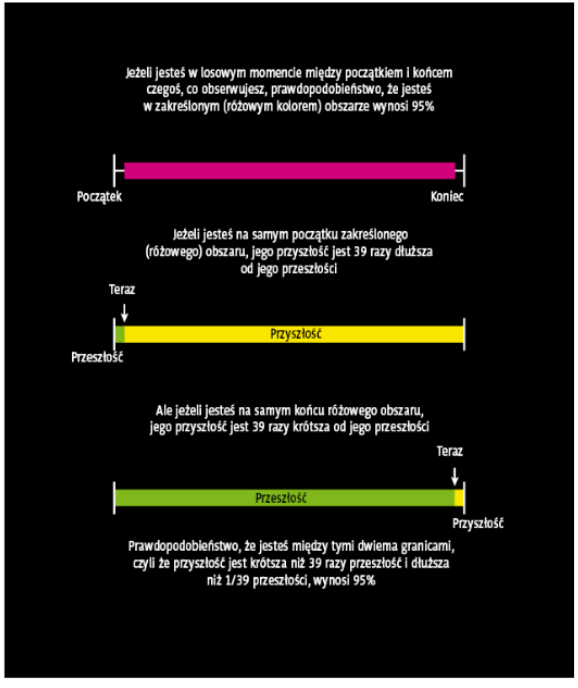
credit: J. Richard Gott

Naukowcy wolą jednak przewidywania, dla których prawdopodobieństwo, że są poprawne, jest większe niż 50%. Lubią formułować przewidywania, dla których prawdopodobieństwo, że są poprawne, wynosi 95%. Jest to ów znany poziom ufności 95% spotykany w publikacjach naukowych. W jaki sposób to zmienia moją argumentację? Stosując zasadę kopernikańską, należy pamiętać, że jeżeli twoje położenie w czasie nie jest w żaden sposób wyróżnione (szczególne), to prawdopodobieństwo, że jesteś gdzieś w środkowej strefie obejmującej 95% okresu obserwacji czegoś, co obserwujesz (czyli nie jesteś ani w początkowych 2,5% okresu, ani w końcowych 2,5% okresu, lecz gdzieś pomiędzy nimi) — to prawdopodobieństwo wynosi 95% (il. 24.3).

Wyrażone jako ułamek 2,5% jest równe 1/40. Jeżeli twoja obserwacja wypada na samym początku tej środkowej części obejmującej 95% okresu, to 1/40 (czyli początkowe 2,5%) całej historii stanowi przeszłość, a pozostałe 39/40 jest jeszcze w przyszłości. W tym przypadku przyszłość jest 39 razy dłuższa niż przeszłość. Jeżeli jesteś na samym końcu środkowej części, to 39/40 całej historii stanowi przeszłość, a 1/40 pozostaje na przyszłość. W tym przypadku przyszłość jest 39 razy krótsza niż przeszłość. Jeżeli zatem jesteś w środkowej strefie 95%, między dwiema granicami (szansa, że tam jesteś, wynosi 95%), to oznacza, że przyszłość jest krótsza niż 39 razy przeszłość i dłuższa niż 1/39 razy przeszłość. Czyli: przyszłość zjawiska, które

obserwujesz, jest krótsza niż 39 razy przeszłość i dłuższa niż 1/39 razy przeszłość (z prawdopodobieństwem równym 95%).

Zastosujemy to rozumowanie do pytania o długowieczność naszego gatunku, *Homo sapiens*. Nasz gatunek istnieje już około 200 tysięcy lat, licząc od mitochondrialnej Ewy, mieszkanki Afryki, od której wszyscy pochodzimy. Jeżeli twoje położenie na osi czasu naszego gatunku nie jest w żaden sposób wyróżnione, to z formuły kopernikańskiej wynika — na poziomie ufności 95% — że przyszłość gatunku *Homo sapiens* jest dłuższa niż 5,1 tysiąca lat (200 000/39) oraz krótsza niż 7,8 miliona lat (200 000 × 39)[21]. Nie mamy aktuarialnych danych na temat innych inteligentnych gatunków (czyli takich, które mogłyby zadawać podobne pytania), więc najprawdopodobniej to jest wszystko, co możemy zrobić. Zakres przewidywanej długowieczności jest tak duży, ponieważ chcemy mieć 95% pewności, że wynik jest poprawny, ale wielu ekspertów podaje wyniki swoich oszacowań, które są poza tym zakresem. Według pewnych apokaliptycznych przewidywań *Homo sapiens* może nie przetrwać następnych stu lat. Gdyby to była prawda, nasze pokolenie miałoby pecha, gdyż znajdowałoby się na samym końcu historii gatunku. Są także optymiści, którzy uważają, że skolonizujemy galaktykę i przetrwamy biliony lat. Gdyby to była prawda, nasze pokolenie miałoby szczęście, gdyż znajdowałoby się na samym początku historii gatunku. Formuła kopernikańska, mimo szerokiego zakresu swoich przewidywań, dostarcza nam jednak pewnej informacji, ograniczając zakres w większym stopniu niż wiele innych oszacowań.



ILUSTRACJA 24.3. Formuła kopernikańska (poziom ufności 95%)

Credit: J. Richard Gott

Wszystko, czego nauczyliśmy się w astronomii, mówi nam, że powinniśmy traktować poważnie zasadę kopernikańską (czyli tezę, że nasze położenie raczej nie jest wyróżnione). Zaczęliśmy od przekonania, że zajmujemy szczególne, wyróżnione miejsce w centrum Wszechświata. Później dowiedzieliśmy się, że żyjemy na jednej z kilku planet krążących wokół Słońca.

Następnie odkryliśmy, że nasze Słońce jest zwykłą gwiazdą, która nie leży w centrum naszej Galaktyki, lecz znajduje się w niczym niewyróżniającym się miejscu, gdzieś w połowie galaktycznego dysku. Przekonaliśmy się, że nasza Galaktyka jest jedną z kilkudziesięciu galaktyk tworzących przeciętną grupę galaktyk, a grupa należy do przeciętnej supergromady. Im więcej odkrywaliśmy, tym mniej wyjątkowe stawało się nasze miejsce.

Zasada kopernikańska jest jedną z najbardziej skutecznych hipotez wszech czasów, udowadniając swoją słuszność w wielu różnych kontekstach. Christiaan Huygens użył jej, aby wyznaczyć odległość do gwiazd. Zakładając, że gwiazdy są po prostu innymi słońcami podobnymi do naszego Słońca, Huygens zadał sobie pytanie, dlaczego Słońce nie wygląda na niebie jak przeciętna, typowa gwiazda, lecz jest najjaśniejszym światłem we Wszechświecie. Jeżeli inne gwiazdy mają taką samą jasność absolutną jak Słońce, a świecą znacznie słabiej, to musi oznaczać, że są dalej od nas niż Słońce. Huygens założył, że najbliżej nas leży Syriusz, najjaśniejsza gwiazda widoczna na niebie. Zmierzywszy względną jasność Syriusza i Słońca, Huygens oszacował, że Syriusz musi znajdować się 27 664 razy dalej niż Słońce. Ten wynik jest poprawny z dokładnością do czynnika 20, co i tak stanowi godne uwagi osiągnięcie, biorąc pod uwagę nieuniknione, znaczne niedokładności obserwacji. Huygens poprawnie ocenił, że odległości między gwiazdami są ogromne w porównaniu z rozmiarami naszego Układu Słonecznego.

Gdy Hubble odkrył, że inne galaktyki oddalają się od nas we wszystkich kierunkach, mógł dojść do wniosku, że jesteśmy w szczególnym, wyróżnionym miejscu, w centrum masywnej eksplozji. Ale po Koperniku nie mogliśmy już tak łatwo ulec kolejnemu złudzeniu. Widząc tyle galaktyk, nie mogliśmy przecież mieć aż tyle szczęścia, aby żyć w tej jednej w centrum. Skoro to tak wygląda z naszego punktu obserwacji, to musi tak samo wyglądać z punktu widzenia wszystkich obserwatorów we wszystkich galaktykach — w przeciwnym razie bylibyśmy wyróżnieni. To doprowadziło do jednorodnych, izotropowych modeli Wielkiego Wybuchu w ogólnej teorii względności. Gamow, Herman i Alpher użyli ich, aby przewidzieć istnienie promieniowania CMB, siedemnaście lat przed ich odkryciem przez Penziasa i Wilsona. W historii nauki było to jedno z najbardziej zdumiewających, pozytywnie zweryfikowanych przewidywań. Jego sukces w znacznej mierze wynikał z poważnego potraktowania zasady kopernikańskiej i pójścia drogą wskazywaną przez tę zasadę.

Co ciekawe, długowieczność naszego gatunku przewidywana przez formułę kopernikańską zdumiewająco dobrze zgadza się z danymi na temat innych gatunków żyjących na Ziemi. Przewidywana przeze mnie długowieczność gatunku *Homo sapiens* — na poziomie ufności 95% — mieści się w zakresie od 205,1 tysiąca lat do 8 milionów lat (czyli 200 tysięcy lat, które już upłynęły, plus dodatkowe od 5,1 tysiąca do 7,8 miliona lat, które być może czekają nas w przyszłości). Nasz przodek *homo erectus* przetrwał 1,6 miliona lat. Neandertalczycy przetrwali tylko około 300 tysięcy lat. Średnia długowieczność ssaków wynosi 2 miliony lat, natomiast dla innych grup gatunków żyjących na Ziemi — między milionem i 10 milionami lat. Nawet

groźny *Tyrannosaurus rex* wyginął po zaledwie 2,5 miliona lat, wyeliminowany przez uderzenie asteroidy 65 milionów lat temu.

Należy pamiętać, że moje kopernikańskie obliczenia są oparte na naszej przeszłości jako inteligentnego gatunku — obdarzonego samoświadomością, zdolnego do zadawania tego rodzaju pytań, uprawiającego algebrę, jak powiedziałby Neil. Gdybyśmy rzeczywiście mieli przetrwać bilion lat, nasze pokolenie miałoby wyjątkowe szczęście, że znalazło się w tak wczesnej epoce w historii naszego gatunku, zaledwie 200 tysięcy lat od początku. Co więcej, znaleźliśmy się w epoce, w której przewidywana długowieczność naszego gatunku wynikająca z aktualnej długości istnienia gatunku zgadza się z danymi dotyczącymi innych gatunków. Gdybyśmy obserwowali *Homo sapiens* w jakimś losowo wybranym momencie w tej trwającej bilion lat historii — powiedzmy, po 400 miliardach lat — wiedzielibyśmy, że nasz gatunek już przetrwał dużo dłużej niż inne gatunki, i moglibyśmy słusznie przewidywać równie długą przyszłość. Miałbym znacznie bardziej optymistyczne nastawienie co do naszej przyszłości, gdyby ludzka rasa miała już za sobą 400 milionów, a nie 200 tysięcy lat.

Homo sapiens może jednak przetrwać znacznie dłużej niż inne gatunki po prostu dlatego, że jesteśmy gatunkiem inteligentnym. Ale jesteśmy także ssakami i nasza kopernikańska długowieczność jest zgodna z długowiecznością innych gatunków ssaków. Ssaki są wprawdzie wyraźnie mądrzejsze od przeciętnych przedstawicieli królestwa zwierząt, ale długowieczność ssaków wcale nie jest wyraźnie lepsza na tle wszystkich gatunków zamieszkujących Ziemię, a hominidy (takie jak *Homo erectus* i neandertalczycy) nie przetrwały dłużej niż przeciętny gatunek ssaków. Wydaje się, że inteligencja i długowieczność nie są bynajmniej skorelowane, co powinno nam dać do myślenia.

Istotnie, gdybyśmy po prostu użyli aktuarialnych danych na temat innych gatunków ssaków, aby przewidzieć naszą własną długowieczność, dostalibyśmy dalszą przyszłość o długości od 50,6 tysiąca lat do 7,4 miliona lat (na poziomie ufności 95%). Te liczby mieszczą się w granicach wynikających z zasady kopernikańskiej, obliczonych na postawie naszej przeszłej długowieczności jako inteligentnego gatunku. Dopóki pozostajemy na Ziemi, jesteśmy narażeni na te same niebezpieczeństwa, które wyeliminowały inne gatunki. Fakt, że jesteśmy tu od zaledwie 200 tysięcy lat, powinien nam uświadomić, że nasza inteligencja niekoniecznie poprawi nasz los w porównaniu z losem innych gatunków. Inteligencja wcale nie musi być tak użyteczna dla długowieczności gatunku.

Ktoś mógłby pomyśleć, że to nie szkodzi. *Homo sapiens* wymrze, ale po nas przyjdzie jeszcze bardziej inteligentny gatunek, który nas zastąpi. Darwin zwrócił jednak uwagę, że większość gatunków nie pozostawia żadnych gatunków potomnych. Nieliczne gatunki zostawiają wiele gatunków potomnych, skutecznie rozprzestrzeniając swoje geny, ale większość gatunków ginie bezpotomnie. W tym kontekście warto zwrócić uwagę, że wyginęły wszystkie pozostałe gatunki w naszej rodzinie hominidów (łącznie z neandertalczykami, *Homo heidelbergensis*, *Homo erectus*, *Homo habilis* i

Australopithecus). Jesteśmy obecnie jedynym gatunkiem hominidów. Dla porównania, rząd gryzoni liczy 1,6 tysiąca gatunków, które doskonale sobie radzą i mają wiele opcji przetrwania. Dougal Dixon w cudownej książce *After Man* spekuluje, co może się stać po kolejnych 50 milionach lat ewolucji. Jego prognozy raczej nie są pomyślne dla naszego gatunku — za milion lat już nas nie będzie. Za 50 milionów lat króliki nadal będą wszechobecne, ale urosną do rozmiarów jeleni. Na króliki będą polować watahy istot podobnych do szczura, potomków dzisiejszych gryzoni. To, co w tej książce jest najbardziej niepokojące, to fakt, że wszystko, co Dixon opisuje, wydaje się rozsądne, ale z pewnością nie jest to coś, co nam się spodoba. Ani jedno ze zwierząt, które niegdyś żyły na Ziemi, nie było inteligentnym obserwatorem zdolnym do zadawania takich pytań, jak długo przetrwa mój gatunek? Szanse są oczywiście niewielkie, że konkretne przewidywania Dougala Dixona się zrealizują, ponieważ ewolucja może pójść wieloma różnymi ścieżkami, ale jego książka słusznie zwraca uwagę, że większość ścieżek nie obejmuje inteligentnych obserwatorów w odległej przyszłości. Stephen Jay Gould wyraził podobny pogląd, gdy stwierdził, że jesteśmy „tylko jednym cackiem" na bożonarodzeniowym drzewku ewolucji.

Taki sam kopernikański argument stosuje się do całego naszego inteligentnego rodowodu obejmującego nasz gatunek oraz wszystkie inteligentne gatunki, które mogą być naszymi potomkami w przyszłości. Jesteśmy pierwszym inteligentnym gatunkiem w naszym rodowodzie (zdolnym do zadawania takich pytań), więc obecny wiek naszego całego inteligentnego rodowodu wynosi zaledwie 200 tysięcy lat (tylko 1/65 000 wieku Wszechświata), zatem cały nasz inteligentny rodowód raczej nie będzie trwał wiecznie[22], a jego przyszłość powinna mieć takie same granice jak granice innych gatunków. Równie dobrze możemy być jedynym inteligentnym gatunkiem w naszym rodowodzie, skoro jesteśmy pierwszym, a obserwacje Darwina wskazują, że większość gatunków nie pozostawia po sobie żadnych gatunków potomnych.

W pewnych sytuacjach nie należy stosować formuły kopernikańskiej. Nie stosuj jej w czasie ślubu, minutę po tym jak wypowiedziane zostały słowa przysięgi małżeńskiej, przewidując, że małżeństwo potrwa 39 minut! Zostałeś zaproszony w szczególnym momencie — na ślub, który stanowi początek małżeństwa, więc nie jesteś w losowym momencie między początkiem i końcem. Ale na ogół ten warunek jest spełniony i formułę kopernikańską można stosować. Odkąd ją wprowadziłem, była wielokrotnie testowana i skutecznie przewidywała przyszłość wszystkiego, co tylko się nadawało do przewidywania, od sztuk na Broadwayu i musicali, po rządy i panowania światowych liderów[23]. Inny wyjątek: nie stosuj jej do szacowania długowieczności naszego Wszechświata. Możesz się znajdować w szczególnym (nadającym się do zamieszkania) położeniu, ponieważ jesteś inteligentnym obserwatorem (inteligentni obserwatorzy nie byli obecni w gorącej fazie wczesnego Wszechświata i mogą nie być obecni, gdy wypalą się gwiazdy ciągu głównego). Ale wśród inteligentnych obserwatorów twoje położenie w czasoprzestrzeni nie powinno być wyjątkowe. W ogólności

formuła kopernikańska działa, ponieważ wśród wszystkich miejsc, gdzie mogą się znajdować inteligentni obserwatorzy, z definicji jest tylko kilka szczególnych miejsc i wiele nieszczególnych miejsc. Jest duża szansa, że żyjesz w jednym z tych nieszczególnych miejsc. Co więcej, twoja aktualna obserwacja raczej nie jest w szczególnym miejscu w ramach pełnej tabeli obserwacji wykonanych przez inteligentnych obserwatorów.

Nie mamy aktuarialnych danych na temat długowieczności innych inteligentnych gatunków we Wszechświecie. Nie wiemy, jak długo przetrwają. Ale znamy naszą własną przeszłość jako inteligentnego gatunku i nie powinniśmy ignorować tego wyraźnie widocznego fragmentu danych. Formuła kopernikańska mówi nam, jak użyć tej informacji, aby z grubsza oszacować naszą przyszłą długowieczność na poziomie ufności 95%.

Jeżeli nie jesteś wyjątkowy, powinieneś zakładać, że urodziłeś się w jakimś losowym miejscu na chronologicznej liście istot ludzkich. W ciągu 200 tysięcy lat dotychczasowego istnienia naszego gatunku urodziło się około 70 miliardów ludzi. Formuła kopernikańska daje 95% szans, że liczba ludzi, którzy urodzą się w przyszłości, powinna się zmieścić w zakresie od 1,8 miliarda do 2,7 biliona. Od recenzenta mojego artykułu w „Nature" z 1993 roku, Brandona Cartera (tego od zasady antropicznej), dowiedziałem się, że on, John Leslie i Holgar Nielson także zwrócili uwagę, iż jest bardzo mało prawdopodobne, że jesteśmy w pierwszym, maleńkim ułamku liczby wszystkich ludzi, którzy urodzili się na Ziemi. Carter (a później Leslie, który rozwinął pracę Cartera) doszedł do tego wniosku, stosując statystykę bayesowską, natomiast Nielsen niezależnie doszedł do tego samego wniosku, rozumując podobnie jak ja — wychodząc z założenia, że powinniśmy znajdować się w jakimś losowym, przypadkowym miejscu na chronologicznej liście istot ludzkich. Spotkałem podobnie myślących kolegów[24].

Jest bardziej prawdopodobne, że pochodzisz z kraju, którego liczba mieszkańców jest większa od mediany. W połowie spośród stu dziewięćdziesięciu krajów na świecie liczba ludności nie przekracza 7 milionów. W krajach o wysokiej liczbie ludności żyje więcej ludzi, więc 97% wszystkich mieszkańców Ziemi mieszka w krajach, w których liczba ludności jest większa od mediany. Czy urodziłeś się w kraju, którego liczba ludności jest większa od 7 milionów? Jest bardziej prawdopodobne, że żyjesz w kraju, którego liczba ludności jest większa od mediany; i na tej samej zasadzie jest bardziej prawdopodobne, że żyjesz w stuleciu, w którym liczba mieszkańców Ziemi jest większa od mediany. W istocie żyjesz w stuleciu, w którym liczba mieszkańców Ziemi jest największa w całej historii gatunku. Prawdopodobnie żyjesz po jakimś zdarzeniu (na przykład odkryciu rolnictwa), które spowodowało, że populacja poszybowała w górę, lecz przed jakimś zdarzeniem (na przykład uderzeniem asteroidy), które spowodowało, że populacja poszybowała w dół. Prawdopodobnie żyjesz w szczycie zaludnienia, czyli wtedy, gdy liczba mieszkańców Ziemi jest większa niż w stuleciu, które jest medianą. Ten szczyt może się zdarzyć w dowolnym, losowym punkcie historii ludzkości. Jeżeli chcesz wiedzieć, ilu ludzi będzie żyć po tobie, zapytaj,

ilu żyło przed tobą. Jeżeli chcesz wiedzieć, jak długo ludzkość przetrwa w przyszłości, zapytaj, jak długo istniała przed tobą.

Jest bardzo prawdopodobne, że populacja naszej inteligentnej cywilizacji jest większa od mediany populacji wszystkich inteligentnych gatunków we Wszechświecie — z tego samego powodu, dla którego jest prawdopodobne, że żyjesz w kraju o dużej liczbie ludności. Większość inteligentnych obserwatorów żyje w cywilizacji, która jest powyżej mediany, i jest bardzo prawdopodobne, że jesteś jednym z tych licznych obserwatorów, a nie jesteś wśród tych nielicznych, którzy należą do cywilizacji z populacją poniżej mediany. Oznacza to, iż jest bardzo prawdopodobne, że aktualna liczba ludności na Ziemi jest większa od mediany populacji wszystkich inteligentnych gatunków we Wszechświecie. To nie jest typowa sytuacja w powieściach science fiction, gdzie duża, galaktyczna cywilizacja nadciąga, aby zaatakować naszą maleńką Ziemię. To dobry scenariusz dla Hollywood — jesteśmy Dawidem, który musi stawić czoło pozaziemskiemu Goliatowi — ale jest na bakier z rachunkiem prawdopodobieństwa. Jest bardzo prawdopodobne, że nasza inteligentna cywilizacja jest jedną z najbardziej skutecznych cywilizacji w kategorii liczby ludności! Jest bardzo prawdopodobne, że zaawansowane technologicznie cywilizacje mają duże populacje, więc możemy się spodziewać, że jesteśmy jedną z nich[25].

W 2015 roku Fergus Simpson z uniwersytetu w Barcelonie zwrócił uwagę na interesujący skutek uboczny: skoro jest bardzo prawdopodobne, że populacja naszej planety jest większa od mediany, to znaczy, że większość planet zamieszkanych przez inteligentnych obserwatorów to są planety mniejsze od Ziemi. Czyli poszukiwania inteligentnego życia — lub jakiegokolwiek życia — powinny skupić swoją uwagę na planetach mniejszych od Ziemi, gdzie najprawdopodobniej żyje większość poszukiwanych okazów.

Możemy także zastosować formułę kopernikańską (na poziomie ufności 95%), aby obliczyć górną granicę średniej długowieczności radiokomunikatywnych cywilizacji w Galaktyce, czyli liczby L_c, którą należy wstawić do wzoru Drake'a z rozdziału 10. Wychodzimy z założenia, iż jest bardzo prawdopodobne, że żyjemy w jednej z bardziej długowiecznych cywilizacji radiokomunikatywnych, ponieważ zawierają one więcej inteligentnych obserwatorów. Po drugie, jest mało prawdopodobne, że żyjemy na początku naszej epoki radiowej. Ale kilka radiokomunikatywnych cywilizacji może jednak istnieć dłużej niż nasza i w ten sposób powiększać średnią. Wyobraź sobie, że układamy wszystkie cywilizacje radiowe wzdłuż jednej długiej osi czasowej, ale nie chronologicznie, lecz jedna za drugą, w ten sposób, że długość całej osi jest równa sumie długości istnienia wszystkich cywilizacji. Robimy ranking według długości istnienia, ustawiając najdłużej istniejące na końcu osi. Jeżeli nie jesteś wyjątkowy, to znajdujesz się w losowym położeniu na całej tej długiej osi, a także w losowym położeniu w tym segmencie osi (określającym długość istnienia naszej radiowej cywilizacji), który zajmuje *Homo sapiens*. Wychodząc z tych założeń i stosując pewne algebraiczne przekształcenia, zdołałem obliczyć (na poziomie ufności 95%) górną granicę średniej długowieczności cywilizacji

radiokomunikatywnych: 12 tysięcy lat. Gdyby średnia długowieczność była dłuższa, mój artykuł z 1993 roku ukazałby się niezwykle wcześnie w naszej radiowej cywilizacji lub niezwykle wcześnie na powyższej, achronologicznej osi czasu wszystkich radiowych cywilizacji. W ten sposób otrzymujemy kopernikańskie oszacowanie: $L_c < 12$ tysięcy lat, które można wstawić do wzoru Drake'a. Neil wykorzystał to oszacowanie w rozdziale 10.

Jeżeli sądzisz, że inteligentne gatunki zazwyczaj ewoluują w inteligentne mechaniczne gatunki lub w genetycznie zmodyfikowane gatunki, to musisz zadać sobie pytania: dlaczego nie jestem inteligentną maszyną? Dlaczego nie jestem genetycznie zmodyfikowanym osobnikiem?

Jeżeli sądzisz, że inteligentne gatunki zazwyczaj kolonizują swoją galaktykę, to musisz zadać sobie pytanie: dlaczego nie jestem kosmicznym kolonistą? W 1950 roku Enrico Fermi zadał swoje słynne pytanie na temat pozaziemskich istot: gdzie oni są? Dlaczego już dawno nie skolonizowali Ziemi? Odpowiedź na pytanie Fermiego daje zasada kopernikańska: znaczący ułamek wszystkich inteligentnych obserwatorów musi nadal siedzieć na swoich macierzystych planetach (w przeciwnym razie byłbyś wyjątkowym obserwatorem). Przypadki kolonizacji wcale nie zdarzają się tak często. Co ważne, oznacza to, że w ogóle możemy zastosować równanie Drake'a, które szacuje przecież liczbę inteligentnych cywilizacji powstających niezależnie na swoich macierzystych planetach. Jeżeli kolonizacje nie zdarzają się często, to ta liczba jest w przybliżeniu równa liczbie pozaziemskich cywilizacji, które odkryjemy.

Załóżmy, iż a priori sądziłeś, że następujące dwie hipotezy są jednakowo prawdopodobne:

H1. Ludzie pozostaną zawsze na Ziemi, po czym wymrą.
H2. Ludzie skolonizują 1,8 miliarda planet w Galaktyce.

Stosując statystykę bayesowską, musisz pomnożyć swoje prawdopodobieństwo a priori — odpowiednio dla hipotezy H1 i dla H2 — przez prawdopodobieństwo, że zaobserwujesz to, co obserwujesz. W przypadku hipotezy H1 prawdopodobieństwo, że — jako istota ludzka — zaobserwujesz, iż znajdujesz się na Ziemi, wynosi 100%. Jeżeli jednak ludzie skolonizują 1,8 miliarda planet (czyli gdy hipoteza H2 jest prawdziwa), to szansa, że — jako istota ludzka — znajdziesz się na pierwszej z tych 1,8 miliarda planet jest równa 1 do 1,8 miliarda. W takim razie nawet jeżeli początkowo uważałeś, że szanse skolonizowania Galaktyki i szanse, że pozostaniemy na Ziemi są jak 1:1, to wziąwszy pod uwagę fakt, że żyjesz na Ziemi, stosując statystykę bayesowską, musisz zrewidować szanse i uznać, że wynoszą jak 1 do 1,8 miliarda na niekorzyść kolonizacji. Stosując moją kopernikańską argumentację, zakładamy, że skoro nie jesteś wyróżniony, to jest tylko jedna szansa na 1,8 miliarda, że znajdziesz się na pierwszej 1/(1,8 miliarda) ze wszystkich planet zamieszkanych przez ludzi, a zatem tylko jedna szansa na 1,8 miliarda, że skolonizujemy 1,8 miliarda planet, zakładając, że jesteś na pierwszej z nich. Niemniej skolonizowanie kilku planet w przyszłości nie jest aż tak nieprawdopodobne i może nam dać więcej możliwości na

przetrwanie. Powinniśmy jednak zabrać się do tego szybko, dopóki mamy program kosmiczny.

Celem programu lotów kosmicznych powinno być poprawienie perspektyw przetrwania ludzkości przez skolonizowanie kosmosu. Można ten cel zrealizować za rozsądną cenę. Można na przykład wysłać ośmioro astronautów, mężczyzn i kobiet, na Marsa, gdzie mogliby się rozmnażać, wykorzystując lokalne zasoby. Wystarczy znaleźć grupę astronautów, którzy zdecydują się odbyć podróż w jedną stronę na Marsa, aby tam pozostać, mieć dzieci i wnuki. Czyli ludzi, którzy będą założycielami marsjańskiej cywilizacji, a nie wrócą na Ziemię jako celebryci. Nie jest trudno znaleźć takich śmiałków. Story Musgrave, astronauta, którego dobrze znam, powiedział mi kiedyś, że zgłosiłby się na ochotnika do takiej misji. Program Mars One znalazł setkę kandydatów — ochotników, którzy chcieliby być kolonistami na Marsie. Zamrożone jajeczka i komórki spermy mogłyby zostać zabrane w celu genetycznego zróżnicowania (tym sposobem wielu ludzi urodzonych na Ziemi mogłoby mieć potomków na Marsie, mimo niewielkiej liczby astronautów). W odróżnieniu od Księżyca, Mars ma rozsądną grawitację (1/3 ziemskiej), atmosferę, wodę i wszystkie chemikalia niezbędne do życia. W atmosferze jest głównie dwutlenek węgla, z którego można odzyskać niezbędny do życia tlen. Wody jest pod dostatkiem w zmarzlinie i w lodowych czapach na biegunach. Poziomy promieniowania są znośne pod warunkiem, że kolonia będzie umieszczona 10 metrów pod powierzchnią, a koloniści będą odbywać jedynie krótkie wypady na powierzchnię. Nasi przodkowie żyli w jaskiniach — podobnie mogą uczynić marsjańscy koloniści. Nasze sondy znalazły nawet pewne interesujące wejścia do jaskiń, warte zbadania.

Umieszczenie takiej kolonii na Marsie wymagałoby wyniesienia na orbitę tylko tyle masy, ile już wynieśliśmy w przeszłości, więc nie proponuję rzeczy niemożliwych. Według Roberta Zubrina wysłanie ośmiu astronautów na Marsa i zapewnienie im (na wszelki wypadek) statków ratunkowych umożliwiających powrót wymagałoby wyniesienia 500 ton na niską orbitę wokółziemską. Stamtąd zostaliby wysłani na trajektorię prowadzącą w kierunku Marsa, a następnie musieliby wyhamować w jego atmosferze przed lądowaniem. Zdaniem Gerarda O'Neilla kosmiczna kolonia wymaga zaledwie 50 ton na osobę, aby stworzyć biosferę opartą na „życiu w zamkniętym systemie". Dostarczenie tych 400 ton na powierzchnię Marsa wymagałoby wyniesienia około 2 tysięcy ton na niską orbitę wokółziemską. Samowystarczalna kolonia na Marsie, składająca się z ośmiorga kolonistów, wymagałaby w sumie wyniesienia 2,5 tysiąca ton na niską orbitę wokółziemską. Dla porównania, rakiety Saturn V programu Apollo oraz amerykańskie wahadłowce wyniosły ponad 10 tysięcy ton na niską orbitę wokółziemską, a rosyjskie i chińskie programy załogowych lotów jeszcze więcej. NASA rozważa obecnie budowę statku o dużym udźwigu (klasy Saturn V), zdolnego do umieszczenia ładunku 130 ton na niskiej orbicie wokółziemskiej. Budowa kolonii wymagałaby zaledwie dwudziestu lotów (w porównaniu z osiemnastoma rakietami Saturn V, które zostały zbudowane w ramach programu Apollo). Cztery takie rakiety mogłyby być równocześnie

budowane w Vehicle Assembly Building w Centrum Kosmicznym Johna F. Kennedy'ego na Florydzie. Jeżeli zbudowanie takiej rakiety zajmuje dziesięć lat, a cztery mogą być wystrzelone w każdym 26-miesięcznym cyklu, to założenie kolonii na Marsie może potrwać dziewiętnaście lat, licząc od dzisiaj. W chwili, gdy to piszę, program załogowych lotów kosmicznych liczy już pięćdziesiąt pięć lat; zasada kopernikańska sugeruje, że finansowanie programu załogowych lotów kosmicznych ma 50% szans na kolejne pięćdziesiąt pięć lat — dostatecznie długo, aby założyć kolonię na Marsie. Pomysł takiej kolonii wcale nie jest nierozsądny. Elon Musk, szef SpaceX, jest zainteresowany finansowaniem kolonizacji Marsa z funduszy prywatnych. Spotkaliśmy się kiedyś na konferencji na temat Marsa, zorganizowanej przez Roberta Zubrina. Ja mówiłem o powodach, dla których ludzkość powinna chcieć skolonizować Marsa w nieodległej przyszłości, a Elon o tym, jak chciałby to zorganizować! Neil przedstawił argumenty na rzecz wyprawy na Marsa w swojej książce *Space Chronicles.* Założenie kolonii na Marsie zmieniłoby bieg historii świata. W istocie to nie byłaby już historia „świata"! Stephen Hawking dołączył ostatnio, mówiąc w wywiadzie dla bigthink.com: „Sądzę, że na dłuższą metę przyszłość ludzkiej rasy musi być w kosmosie. Bardzo trudno będzie uniknąć katastrofy na planecie Ziemia w następnych stu latach, nie mówiąc już o tysiącu czy milionie lat. Ludzkość nie powinna trzymać wszystkich jajek w jednym koszyku czy na jednej planecie. Miejmy nadzieję, że unikniemy upuszczenia koszyka, zanim rozsiejemy zawartość w kosmosie".

Jeżeli pary kolonistów na Marsie będą mieć średnio po czworo dzieci, populacja będzie się podwajać co trzydzieści lat i osiągnie 8 milionów po sześciuset latach. (małe populacje szybko rosną — cała populacja Aborygenów w Australii pochodzi prawdopodobnie od trzydziestu osobników, którzy dotarli tam z Indonezji na tratwie 50 tysięcy lat temu. W czasach kolonizacji przez Europejczyków populacja Aborygenów liczyła od 300 tysięcy do miliona osób). Jeżeli obawiasz się, że finansowanie programu lotów kosmicznych zostanie wstrzymane, założenie samowystarczalnej kolonii na Marsie jest dokładnie tym, czego ci potrzeba. Nie wysyłaj na Marsa astronautów, którzy powrócą na Ziemię. Zostaw ich tam, gdzie mogą poprawić naszą szansę na przetrwanie. Kolonizacja Marsa dałaby naszemu gatunkowi dwie szanse zamiast jednej, więc mogłaby podwoić nasze długoterminowe perspektywy przetrwania. Byłoby to ubezpieczenie na życie obejmujące wszelkie katastrofy, które mogą dotknąć nas na Ziemi, od katastrof klimatycznych, przez uderzenia asteroid, po nagłe epidemie. Mogłaby także podwoić nasze szanse na dotarcie do Alfy Centauri. Kolonie mogą zakładać kolejne kolonie. Pierwsze słowa na Księżycu były wypowiedziane po angielsku, ale nie dlatego, że Anglia wysłała astronautów na Księżyc, lecz dlatego, że założyła kolonię w Ameryce Północnej.

Jeżeli rozejrzymy się dookoła, możemy zobaczyć Wszechświat, który pokazuje nam, co powinniśmy robić. Żyjemy na maleńkim pyłku w ogromnym Wszechświecie. Wszechświat mówi do nas: rozprzestrzeniajcie się i powiększajcie swoje siedlisko, aby poprawić swoje perspektywy przetrwania.

Żyjemy na planecie pełnej kości wymarłych gatunków, a wiek naszego gatunku jest znikomy wobec czasu Wszechświata jako całości. Powinniśmy się rozprzestrzeniać, zanim wymrzemy. Mamy program kosmiczny, który trwa zaledwie pół wieku, ale jest zdolny do wysłania nas na inne planety. Powinniśmy zrobić z niego jak najmądrzejszy użytek, zanim się skończy. Czy podejmiemy wyzwanie, czy odwrócimy się plecami do Wszechświata? Sam fakt, iż rozmawiamy o tym na Ziemi, stanowi ostrzeżenie, że na zawsze pozostaniemy uwięzieni na Ziemi.

W lecie 1969 roku widziałem nie tylko mur berliński, lecz odwiedziłem także Stonehenge. Stonehenge miało wtedy około 3870 lat. Nadal tam jest! Wybrałem się również na Florydę, aby zobaczyć start rakiety Saturn V niosącej na Księżyc Neila Armstronga, Buzza Aldrina i Michaela Collinsa w statku Apollo 11. Rakiety Saturn V startowały wtedy w kierunku Księżyca co siedem miesięcy. Po 3,5 roku loty na Księżyc zostały zakończone. Widok startującej rakiety Saturn V był spektakularny (zob. moje zdjęcie startu na il. 24.4). Gdy unosiła się coraz wyżej i wyżej, wyglądała jak jakiś magiczny miecz, ciągnąc smugę ognia znacznie dłuższą od samej rakiety. Nigdy nie widziałem czegoś podobnego. Około miliona ludzi zgromadziło się, aby oglądać start. Oglądali start w idealnej ciszy, lecz gdy rakieta zniknęła w warstwie pierzastych chmur, tłum dał upust emocjom w gromkim aplauzie. Kolonizacja kosmosu jest tym, co powinniśmy robić.



ILUSTRACJA 24.4. Start Apollo 11

Photo credit: J. Richard Gott

Nasza inteligencja daje nam ogromny potencjał, dzięki któremu możemy skolonizować galaktykę i stać się supercywilizacją, ale większość inteligentnych gatunków nie osiąga tego celu — w przeciwnym razie byłbyś wyjątkowym okazem jako członek gatunku wciąż żyjącego na jednej planecie. Kontrolujemy źródła energii, które są znacznie mniej wydajne niż nasze własne Słońce. Nie jesteśmy potężnym gatunkiem i nie istniejemy długo. Ale jesteśmy inteligentnymi istotami, nauczyliśmy się bardzo dużo na temat Wszechświata i praw, które nim rządzą — jak dawno się zaczął, jak powstały jego galaktyki, gwiazdy i planety. To oszałamiające osiągnięcie, którego historię opowiedzieliśmy w tej książce.

[1] Przełożył Stanisław Barańczak, www.limeryki.pl/import.html.

[2] Mark Alpert i ja badaliśmy, jak teoria względności funkcjonowałaby we Flatlandii. Odkryliśmy, że geometria wokół punktowej masy ma stożkowaty kształt, a odległe obiekty nie przyciągałyby się tam, ponieważ pusta przestrzeń jest lokalnie płaska (czyli stożek może być zrobiony z płaskiego kawałka papieru przez usunięcie wycinka koła i sklejenie powstałych krawędzi). Praca nad Flatlandią zainspirowała moją późniejszą pracę nad kosmicznymi strunami. Aby otrzymać dokładne rozwiązanie dla kosmicznej struny, musiałem tylko dodać pionową współrzędną do dokładnego rozwiązania we Flatlandii dla punktowej masy. W tym przypadku badania świata fantazji doprowadziły do interesujących rozwiązań w realnym świecie. Fakt, że punktowe masy we Flatlandii nie przyciągają się grawitacyjnie powoduje, iż powstawanie planet przez agregację masy byłoby tam trudniejsze.

[3] *Flatlandia czyli Kraina Płaszczaków: powieść o wielu wymiarach*, przeł. Jacek Dziedzic i in., Gdańsk: Gdańskie Wydawnictwo Oświatowe, 1997.

[4] Ta koncepcja została rozwinięta w 1984 roku przez A. Dewdneya w jego książce *Planiverse*. W 2007 roku w animowanym filmie *Flatland* Martin Sheen i Kristen Bell użyczyli swoich głosów postaciom Arthura Square'a i jego wnuczki Hex (hexagon). Jeden z moich mentorów na studiach na Harvardzie, Thomas Banchoff, dodał pouczający komentarz matematyczny jako ekstradodatek na DVD.

[5] Teoria Kaluzy-Kleina przeżyła renesans w latach 1976-1984, gdy ją znacznie zmodyfikowano i zapostulowano istnienie więcej niż pięciu wymiarów czasoprzestrzeni. Napotkała jednak bardzo poważne trudności i w rezultacie odrzucono ją; obecnie ma znaczenie czysto historyczne.

[6] Cząstki W i Z zostały odkryte w akceleratorze SPS (Super Proton Synchrotron) w CERN-ie w 1983 roku. LHC został uruchomiony dwadzieścia pięć lat później, w 2008 roku.

[7] Angielski termin „Big Crunch" w polskiej literaturze tłumaczony jest najczęściej jako Wielki Kres lub Wielki Krach, lecz spotyka się także określenia: Wielki Kolaps, Wielki Zgniot, Wielka Zapaść, Wielki Skurcz.

[8] W 1982 roku w swoim artykule w „Nature" stwierdziłem: „nasz Wszechświat jest jednym z normalnych bąbelków próżniowych".

[9] W tym samym artykule, kontynuując prace Sidneya Colemana na temat powstawania bąbelków, wskazałem tunelowanie kwantowe jako proces, w którym mogły powstawać bąbelkowe wszechświaty: „możemy zatem postrzegać powstanie naszego Wszechświata jako zjawisko tunelowania kwantowego".

[10] Tytuł artykułu Hawkinga z 1982 roku brzmiał *The Development of Irregularities in a Single Bubble Inflationary Universe* (Rozwój nieregularności w inflacyjnym wszechświecie pojedynczego bąbelka) i zawierał m.in. odnośniki do artykułów Lindego, Albrechta, Steinhardta i moich. Zdarzenia z tamtego roku są opisane w artykule *Physics News w 1982*, opublikowanym przez American Institute of Physics; na okładce był kluczowy diagram z mojego artykułu.

[11] Ta urocza anegdotka ukazuje, że jest sporo naukowców wierzących (w różnym stopniu) w prawdziwość inflacji. Nauka opiera się jednak na dowodach, nie na wierze. Autor jest optymistą wierzącym, że dowody już są lub wkrótce będą. Jest jednak wielu uczonych, którzy twierdzą, że inflacja ma kruche podstawy teoretyczne i że obserwacyjne jej potwierdzenie jest obecnie niemożliwe i w przyszłości również będzie to nader wątpliwe.

[12] To jest hipoteza, czy raczej próba wizualizacji hipotezy.

[13] To znaczy zjawiska grawitacyjne mają naturę kwantową.

[14] Kwantowa teoria grawitacji znajduje się we wczesnej fazie zalążkowej, więc stwierdzenie, że pole grawitacyjne jest rojem grawitonów, podobnie jak wiązka światła jest rojem fotonów (i że grawitony zachowują się podobnie jak fotony), jest oparte na rozumowaniu przez analogię. Autor wykazuje tu nadmierny optymizm poznawczy.

[15] Opisuję to szczegółowo w mojej książce *Kosmiczna pajęczyna*.

[16] Angielskie nazwy kwarków b oraz t ewoluowały w czasie, ale z zachowaniem pierwszej litery; angielska ewolucja wywołała pewne zamieszanie w polskim nazewnictwie.

[17] Pierwotna nukleosynteza zaczęła się mniej więcej w trzeciej minucie i trwała kilkadziesiąt minut.

[18] Rekombinacja plazmy była procesem długotrwałym. Rekombinacja wodoru zaczęła się powyżej 6000 K i trwała dziesiątki, a raczej setki tysięcy lat; zakończyła się (niecałkowicie) przy temperaturze około 1000 K. W kosmologii podaje się, umownie, dwie temperatury, które mają

odpowiadać zakończeniu tego procesu. Autor jest zwolennikiem temperatury 3000 K; wielu badaczy preferuje wartość 3500 K.

19 Niestety, nie da się tego prosto wyjaśnić. Czytelnika prosimy o przyjęcie na wiarę, że stan tej próżni może ulec rozpadowi.

20 Jeszcze bardziej szczegółowo przedyskutowałem trzy scenariusze, $w > -1$, $w = -1$ oraz $w < -1$, w *Kosmicznej pajęczynie*.

21 Opublikowałem to w czasopiśmie „Nature" (27 May 1993) w artykule zatytułowanym *Implications of the Copernican Principle for our Future Prospects* (Implikacje zasady kopernikańskiej dla naszych przyszłych perspektyw).

22 Czy nasz inteligentny rodowód (*Homo sapiens* oraz jego inteligentni potomkowie) ma szanse trwać wiecznie? Nasz inteligentny rodowód istnieje od 200 tysięcy lat. To bardzo niewiele (jak 1 do 65 000) wobec wieku Wszechświata. W miarę jak nasz inteligentny rodowód będzie coraz starszy, stosunek jego wieku do wieku Wszechświata będzie się zbliżał do 1; jeżeli nasz inteligentny rodowód trwa wiecznie, większość jego obserwatorów musi widzieć, że jego wiek jest tego samego rzędu co wiek Wszechświata. Ty tego nie widzisz, więc to uczyniłoby cię kimś szczególnym. Możemy tę ideę określić ilościowo. Wyobraź sobie dwuwymiarowy diagram, na którym pionowa współrzędna y reprezentuje wiek Wszechświata w momencie, gdy zaczął się nasz inteligentny rodowód, a pozioma współrzędna x reprezentuje wiek Wszechświata w momencie, w którym ty go obserwujesz. Każdy punkt na wykresie reprezentuje zatem twoją możliwą obserwację. Ale są ograniczenia. Obie współrzędne są dodatnie (co ogranicza wykres do prawego górnego kwadrantu). Twoje obserwacje muszą się zdarzyć po początku naszego inteligentnego rodowodu, więc musi być spełniony warunek $x > y$. To ogranicza twoje obserwacje do połowy tego kwadrantu, czyli do 1/8 całej płaszczyzny — oktantu ograniczonego przez kierunki: wschód oraz północny wschód. Możesz ten oktant zwizualizować jako kąt 45° wychodzący z początku układu i rozciągający się do nieskończoności — skoro zakładamy, że nasz inteligentny rodowód trwa wiecznie. Twój punkt obserwacji (określony przez wartości x i y) może leżeć gdziekolwiek wewnątrz tego kąta. Jeżeli twój punkt obserwacji nie jest wyróżniony, to prawdopodobieństwo, że leży on wewnątrz wąskiego wycinka o szerokości 1° przylegającego do diagonalnej linii $x = y$ wynosi 1/45. W rzeczywistości jesteś jeszcze bliżej tej diagonalnej linii. Twoja obserwacja ma współrzędne, które łączy równanie $x = y\ [1 + (1/65\ 000)]$. Twój punkt (x, y) leży zaledwie 0,00044° od linii $x = y$, która stanowi górną granicę całego obszaru możliwych obserwacji. Prawdopodobieństwo, że losowa obserwacja jest tak blisko granicy, wynosi $P = 0{,}00044°/45° = 10^{-5}$. Czyli, jeżeli nasz inteligentny rodowód trwa wiecznie, a twoja obserwacja nie jest wyróżniona, byłoby wyjątkowo mało prawdopodobne (z prawdopodobieństwem równym 10^{-5}), abyś zaobserwował wiek naszego inteligentnego rodowodu równy lub krótszy niż 1/65 000 wieku Wszechświata. Zasada kopernikańska mówi, że jest wyjątkowo mało prawdopodobne ($P = 10^{-5}$), abyś znalazł się w sytuacji, gdzie twoje położenie jest wyróżnione w proporcji jak 1 do 100 000 (gdyby nasz inteligentny rodowód trwał wiecznie). W rezultacie zasada kopernikańska mówi nam — zgodnie ze zdrowym rozsądkiem — że jest wyjątkowo mało prawdopodobne ($P = 10^{-5}$), że nasz inteligentny rodowód trwa wiecznie. A jeżeli nie trwa wiecznie, to zasada kopernikańska przewiduje (na poziomie ufności 95%), kiedy nastąpi koniec.

23 Formułę kopernikańską można testować. Na przykład w dniu publikacji mojego artykułu na Broadwayu wystawiane były 44 przedstawienia i musicale. Te z nich, które niedawno miały premierę, były szybko zdejmowane z afisza. Na przykład *Marisol* miała premierę 7 dni wcześniej i została zdjęta po kolejnych 10 dniach, w granicach czynnika 39, zgodnie z moimi przewidywaniami. Formuła równie dobrze działa dla przedstawień, które są wystawiane dłużej. Na przykład słynny musical *The Fantastics* miał premierę 12 077 dni wcześniej i był jeszcze wystawiany przez kolejne 3153 dni, również w granicach czynnika 39. W sumie, z ogólnej liczby przedstawień i musicali, które były na mojej liście, poprawnie trafiłem 42 na 42, a dwie pozostały do późniejszej weryfikacji. Mógłbym nawet nie trafić tych dwóch, a i tak zmieściłbym się w 95%.

W tym samym dniu na świecie było 313 ludzi u władzy — głów państwa i szefów rządów niepodległych krajów. Obecnie większość z nich już nie rządzi. Jeżeli żaden z tych, którzy jeszcze rządzą, nie przekroczy wieku stu lat w trakcie pełnienia swojego urzędu, to współczynnik trafień formuły będzie powyżej 94% (niezwykle blisko spodziewanej wartości 95%). W pełnej zgodzie z kopernikańskimi oczekiwaniami Henry Bienen i Nicholas van de Walle doszli do wniosku w swojej książce *Of Time and Power* (O czasie i władzy), po szczegółowej, statystycznej analizie 2256 światowych liderów: „Dotychczasowy czas sprawowania władzy stanowi bardzo dobry

wskaźnik, jak długo dany lider pozostanie u władzy. Ze wszystkich przebadanych zmiennych ten predyktor daje najwyższy poziom ufności".

P.T. Landsberg, J.N. Dewynne i C.P. Please opublikowali 30 września 1993 roku w „Nature" artykuł, w którym użyli mojej formuły, aby przewidzieć, jak długo partia konserwatywna będzie rządzić w Wielkiej Brytanii. Oszacowali na poziomie ufności 95%, że skoro rządziła przez 14 lat, to będzie rządziła jeszcze co najmniej przez 4,3 miesiąca, ale nie dłużej niż 546 lat. Straciła władzę 3,6 roku później, zgodnie z tym przewidywaniem.

Użyłem tablic aktuarialnych Organizacji Narodów Zjednoczonych i obliczyłem, że gdyby w 1993 roku każda osoba na świecie użyła mojej formuły, aby obliczyć swoją przewidywaną długowieczność, to dla 96% z nich wynik byłby poprawny.

Filozofowie, Bradley Montond i Brian Kierland, bronili mojej kluczowej tezy w artykule opublikowanym w 2006 w czasopiśmie „The Philosophical Monthly". Uzasadniali w nim, że moja formuła może być użyta do przewidywania przyszłej długowieczności dla problemów o dowolnej skali czasowej, a także w przypadkach, gdy skala czasowa nie jest znana. Dowolny problem probabilistyczny może być ujęty w formalizmie bayesowskim. Rozumowanie bayesowskie wyjaśnia, jak należy zrewidować uprzednie przewidywania, gdy nowe dane stają się dostępne. Moja kopernikańska formuła jest równoważna zastosowaniu rozkładu zwanego *vague* (*Jeffreys*) *Bayesian prior* (minimalnie informatywny aprioryczny rozkład Jeffreysa) (zwanemu także *public policy prior* (aprioryczny rozkład Bayesa stosowany w polityce publicznej), ponieważ jest tak zaprojektowany, aby każdy mógł go użyć). Rewidujesz swoje uprzednie przewidywania, gdy zaobserwujesz i uwzględnisz przeszłą długowieczność. Jest to agnostyczny rodzaj rozumowania a priori, uwzględniający jednakowo (ważący równomiernie) każdy rząd wielkości całkowitej długowieczności. Jeżeli nie masz danych aktuarialnych na temat inteligentnych gatunków (czyli takich, które mogłyby zadawać podobne pytania), to prawdopodobnie jest to najlepszy możliwy sposób — i otrzymasz takie same rezultaty, jakie daje moja kopernikańska formuła. Każdy obserwator może ją zastosować i wśród wszystkich inteligentnych obserwatorów twoje położenie w czasoprzestrzeni nie powinno być wyjątkowe.

[24] Rozumowanie autora opiera się na niejawnym założeniu, że przez cały okres istnienia danego gatunku czy trwania jakiegoś zjawiska przyrodniczego lub społecznego warunki zewnętrzne umożliwiające jego istnienie nie ulegają znacznym zmianom. Biorąc pod uwagę fakt, że Ziemia jest intensywnie eksploatowana, ocena autora, iż mamy przed sobą nie mniej niż 5 tysięcy lat istnienia gatunku, jest dość optymistyczna. Równie realna wydaje się prognoza, że ludzka cywilizacja ulegnie zagładzie w ciągu kilku stuleci.

[25] Optymizm autora jest oparty na dość ułomnej argumentacji, albowiem o pozaziemskich cywilizacjach nie wiemy empirycznie nic.

Podziękowania

Zarówno sama książka, jak i wykład, który był inspiracją dla książki, powstały dzięki ciężkiej pracy wielu ludzi. Po pierwsze, chcielibyśmy podziękować naszym koleżankom i kolegom z Uniwersytetu Princeton, od których tak wiele się nauczyliśmy przez lata, i którzy zapewnili nam tak produktywną i przyjazną atmosferę pracy. Na naszą szczególną wdzięczność zasługuje profesor Neta Bahcall, która jest autorką pomysłu wspólnej pracy.

Dziękujemy naszym studentom i studentkom, którzy nas wspierali, są to między innymi: Cullen Blake, Wes Colley, Julie Comerford, Daniel Grin, Yeong-Shang Loh, Justin Schafer, Joshua Schroeder, Zack Slepian, Iskra Strateva i Michael Vogeley. Nasze podziękowania za pomoc w tym przedsięwzięciu zechcą także przyjąć: Ramin Ashraf, Sorat Tungkasiri, Paula Brett, Sofia Kirhakos Strauss (żona Michaela) oraz Kathy Gryzeski, a także Lucy Pollard-Gott (żona Richa), która wykonała adiustację całej książki. Dziękujemy Robertowi J. Vanderbei za udostępnienie niektórych astrofotografii, oraz Li-Xin Li za pomoc w obróbce grafiki. Adam Burrows, Chris Chyba, Matias Zaldarriaga, Robert J. Vanderbei i Don Page poświęcili wiele czasu na rozmowy z nami, za co serdecznie dziękujemy.

Dziękujemy Markowi Bellisowi, naszemu redaktorowi z Princeton University Press; adiustatorowi Cydowi Westmorelandowi; oraz — za jej wyjątkową wiarę i wizję — naszej wydawczyni, Ingrid Gnerlich.

Michael A. Strauss

Neil deGrasse Tyson

J. Richard Gott

Dodatek 1 – Wyprowadzenie $E=mc^2$

Przypuśćmy, że w twoim laboratorium cząstka o masie m porusza się powoli z lewej strony w prawo, z prędkością υ znacznie mniejszą od prędkości światła (czyli $\upsilon << c$). Stosując prawa Newtona, możemy stwierdzić, że pęd tej cząstki wynosi $P = m\upsilon$, i jest skierowany w prawo. W pewnej chwili cząstka emituje dwa fotony o energii $E = h\nu_0$ w przeciwnych kierunkach: jeden w prawo, drugi w lewo. Cząstka traci energię $\Delta E = 2h\nu_0$ równą (w układzie odniesienia cząstki) energii unoszonej przez dwa fotony. Einstein pokazał, że fotony mają nie tylko energię, ale także pęd. Pęd fotonu jest równy jego energii podzielonej przez prędkość światła c. Cząstka widzi dwa fotony oddalające się od niej z jednakowym pędem, lecz w przeciwnych kierunkach, więc całkowity pęd unoszony przez fotony jest równy zeru, z punktu widzenia cząstki. Cząstka „myśli", że jest w spoczynku (zgodnie z pierwszym postulatem) i emituje dwa fotony w przeciwnych kierunkach. Z symetrii układu wynika, że jeżeli nieruchoma cząstka wyemituje dwa fotony o jednakowej częstotliwości, ale w przeciwnych kierunkach, to po emisji cząstka nadal pozostanie nieruchoma. Odrzuty pochodzące od obu fotonów wzajemnie się zniwelują. Linia świata cząstki będzie prosta — nie zmieni się ani jej prędkość, ani kierunek (il. 18.4).

Foton lecący w prawo trafi w prawą ścianę laboratorium, więc lekko popchnie ścianę w prawo. Jest to zjawisko zwane ciśnieniem promieniowania: ściana absorbuje foton, przejmuje jego pęd, więc zostaje popchnięta w prawo. Obserwator siedzący obok prawej ściany zobaczy foton biegnący w prawo i trafiający w ścianę. Jeżeli zmierzy częstotliwość tego fotonu, to okaże się, że jest ona większa od częstotliwości, z jaką foton został wyemitowany (będzie przesunięta ku fioletowemu końcowi widma), ponieważ cząstka zbliża się do prawej ściany. Jest to przykład efektu Dopplera. Z drugiej strony laboratorium obserwator, siedząc obok lewej ściany, zobaczy foton biegnący w lewo i trafiający w lewą ścianę. Jeżeli zmierzy częstotliwość tego fotonu, to okaże się, że jest ona przesunięta ku czerwieni, ponieważ cząstka, która wyemitowała foton, oddala się od lewej ściany. Foton o większej częstotliwości (przesuniętej ku fioletowi) niesie większy pęd niż foton o mniejszej częstotliwości (przesuniętej ku czerwieni). Zatem prawa ściana zostanie mocniej kopnięta (w prawo) niż lewa ściana (kopnięta w lewo). Nierówne kopnięcia się nie zniwelują i w rezultacie laboratorium jako całość otrzyma sumaryczne kopnięcie w prawo, czyli będzie miało niezerowy pęd skierowany w prawo. Policzmy, jak silne jest to sumaryczne kopnięcie.

Czas między dwoma grzbietami fali emitowanych fotonów (postrzeganych jako fale świetlne), zmierzony przez cząstkę, wynosi Δt_0. Czas między emisją dwóch kolejnych grzbietów, Δt_0, jest równy odwrotności częstotliwości światła ν_0 zmierzonej przez cząstkę. Jeżeli na przykład światło ma częstotliwość 100 cykli na sekundę, to czas między emisją dwóch kolejnych

grzbietów wynosi 1/100 sekundy. Czyli $\Delta t_0 = 1/\nu_0$. Niech v będzie prędkością cząstki względem laboratorium. Zegar cząstki tyka w tempie (zmierzonym w układzie odniesienia laboratorium) wolniejszym o czynnik $\sqrt{[1 - (v^2/c^2)]}$ względem zegara laboratorium, jak pokazaliśmy. Ale w tych obliczeniach zakładamy, że $v << c$, czyli zamierzamy pominąć wszystkie wyrażenia rzędu (v^2/c^2) i pozostawić tylko wyrażenia rzędu (v/c) (na przykład, jeżeli $v/c = 10^{-4}$, co odpowiada $v = 30$ km/s, czyli orbitalnej prędkości Ziemi wokół Słońca, to $v^2/c^2 = 10^{-8}$; to drugie wyrażenie jest tak małe w porównaniu z pierwszym, że możemy je pominąć). Rozważamy sytuację, w której $v << c$, czyli tempo, w jakim tyka zegar cząstki, jest w przybliżeniu takie samo jak tempo, w jakim tyka zegar laboratorium. To oznacza, że przedział czasu między tyknięciami, postrzegany przez cząstkę (Δt_0) i przez laboratorium $(\Delta t')$ jest w przybliżeniu taki sam.

Zatem obserwator nieruchomy względem laboratorium widzi, że między emisją pierwszego grzbietu fali i następnego grzbietu fali upływa czas $\Delta t' = \Delta t_0 = 1/\nu_0$ (wróć do ilustracji 18.4, gdzie interwał $\Delta t'$ jest pokazany jako pionowa przerywana linia). W momencie, gdy kolejny grzbiet fali jest emitowany przez cząstkę w prawo, pozostaje w tyle za poprzednim grzbietem o odległość równą $d = (c - v)\Delta t'$. Jest to odległość (równa $c\Delta t'$), jaką wiązka światła przebyła w czasie $\Delta t'$ minus odległość, jaką przebyła cząstka (równa $v\Delta t'$). Oba grzbiety fali poruszają się z prędkością światła c (dzięki drugiemu postulatowi Einsteina), więc odległość między nimi pozostaje stała i wynosi $d = (c - v)\Delta t'$. Długość fali λ_R widziana przez obserwatora siedzącego przy prawej ścianie laboratorium jest równa tej odległości między grzbietami, więc $\lambda_R = (c - v)\Delta t'$. Diagram czasoprzestrzenny na ilustracji 18.4 obrazuje ten eksperyment myślowy. Odległość λ_R między grzbietami jest mierzona w jednej chwili w układzie laboratorium (wzdłuż poziomej linii na diagramie czasoprzestrzennym).

Przedział czasu (interwał) między przybyciem dwóch kolejnych grzbietów fali do prawej ściany wynosi zatem $\Delta t_R = \lambda_R/c = (c - v)\Delta t'/c$, a częstotliwość fotonu biegnącego w prawo wynosi $\nu_R = 1/\Delta t_R = c/[(c - v)\Delta t'] = \nu_0 c/(c - v)$. Jeżeli $v << c$, to wielkość $c/(c - v)$ jest w przybliżeniu równa $[1 + (v/c)]$, z dokładnością do wyrazów pierwszego rzędu względem v/c (na przykład, jeżeli $v/c = 0{,}00001$, to $c/(c - v) = 1/0{,}99999 = 1{,}00001$ z dużą dokładnością — spróbuj to policzyć na kalkulatorze). Czyli obserwator siedzący przy prawej ścianie laboratorium widzi, że foton, który trafia w prawą ścianę ma częstotliwość równą $\nu_R = \nu_0 [1 + (v/c)]$, czyli większą niż częstotliwość ν_0, z jaką fotony zostały wyemitowane. Czynnik $[1 + (v/c)]$ wynika z efektu Dopplera, a v jest prędkością cząstki. Jest to standardowy wzór na przesunięcie ku fioletowi wynikające z efektu Dopplera dla światła padającego na prawą ścianę, wyemitowanego przez cząstkę poruszającą się z niewielką prędkością v w kierunku tej ściany.

Gdy foton biegnący w prawo uderza w prawą ścianę, oddaje jej pęd równy $h\nu_R/c = h\nu_0[1 + (v/c)]/c$ i skierowany w prawo.

Cząstka emituje także foton biegnący w lewo i trafiający w lewą ścianę. Obserwator siedzący obok lewej ściany zobaczy, że foton biegnący w lewo trafia w lewą ścianę z częstotliwością równą $\nu_L = \nu_0 [1 - (v/c)]$. Znak prędkości w tym wzorze jest przeciwny, ponieważ obserwator siedzący obok lewej ściany widzi cząstkę oddalającą się od niego z prędkością v. Jeżeli zmierzy częstotliwość tego fotonu, to okaże się, że jest ona mniejsza niż częstotliwość ν_0, z jaką fotony zostały wyemitowane, ze względu na efekt Dopplera. Zatem całkowity pęd, jaki fotony przekazują laboratorium, jest skierowany w prawo i równy wartości pędu oddanego przez prawy foton, $h\nu_0[1 + (v/c)]/c$, minus wartość pędu oddanego przez lewy foton, $h\nu_0[1 - (v/c)]/c$, skierowanego w przeciwnym kierunku. W sumie oba fotony nadały laboratorium całkowity pęd równy $2h\nu_0(v/c^2)$, skierowany w prawo, ponieważ foton o wyższej częstotliwości (przesuniętej ku fioletowi), biegnący w prawo, kopie ścianę mocniej niż foton o niższej częstotliwości (przesuniętej ku czerwieni), biegnący w lewo. Energia, jaką w postaci dwóch fotonów emituje cząstka, wynosi $\Delta E = 2h\nu_0$. Zatem pęd nadany laboratorium przez fotony wynosi $\Delta E\,(v/c^2)$. Czynnik v/c^2 wynika z przesunięcia Dopplera (v/c) oraz ze stosunku pędu do energii $(1/c)$ dla fotonów.

Zasada zachowania pędu wymaga, że skierowany w prawo pęd, jaki zyskało laboratorium, musi być równy skierowanemu w prawo pędowi utraconemu przez cząstkę. Skierowany w prawo pęd cząstki jest równy mv ($v << c$, więc stosujemy wzór Newtona dla pędu). Prędkość cząstki nie uległa zmianie, więc jedyny sposób, aby skierowany w prawo pęd cząstki się zmniejszył, polega na tym, że zmniejszyła się jej masa. Zmiana pędu cząstki wynosi zatem $v\Delta m$, gdzie Δm jest równe utraconej przez cząstkę masie.

Przyrównujemy pęd zyskany (laboratorium) i pęd utracony (cząstka): $\Delta E\,(v/c^2) = v\Delta m$. Dzielimy obie strony przez prędkość v cząstki i otrzymujemy $\Delta E/c^2 = \Delta m$. Jeżeli prędkość v jest mała, czyli spełniony jest warunek $v << c$, wynik nie zależy od v. Masa cząstki się zmniejsza. Ilość utraconej masy, Δm, pomnożona przez c^2, jest równa ilości energii, ΔE, wyemitowanej przez cząstkę w postaci dwóch fotonów. Usuwamy symbole Δ po obu stronach i otrzymujemy $E = mc^2$. Energia wyemitowana przez cząstkę w postaci dwóch fotonów jest równa masie utraconej przez cząstkę, pomnożonej przez c^2. Gdy cząstka traci masę, oddaje energię równą $E = mc^2$. Wiele książek wyjaśnia znaczenie tego równania oraz tłumaczy, jak ono działa, ale nie opisuje, jak można je wyprowadzić. Teraz wiesz, jak się to robi[1].

---

[1] Stosując jawnie nierelatywistyczne przybliżenia, wyprowadzono wzór, który w STW ściśle obowiązuje dla wszystkich prędkości.

Dodatek 2 – Bekenstein, entropia czarnych dziur i informacja

Współczesne twarde dyski o średnicy 6 cali mieszczą około 5 terabajtów, czyli 4×10^{13} bitów informacji. Ile bitów informacji można maksymalnie upchać w twardym dysku o średnicy 6 cali? Po pierwsze, skoro jest to eksperyment myślowy, użyjemy kuli zamiast dysku, aby zmieścić jak największą objętość w dysku o tej średnicy — kula będzie miała rozmiary mniej więcej takie jak grejpfrut o promieniu 7,5 centymetra. Bekenstein pokazał, że czarna dziura ma skończoną entropię, proporcjonalną do powierzchni jej horyzontu zdarzeń. Ostatecznie okazało się, że entropia S horyzontu czarnej dziury jest dokładnie równa 1/4 pola powierzchni horyzontu zdarzeń, gdy powierzchnia jest mierzona w jednostkach równych długości Plancka podniesionej do kwadratu (dokładną wartość policzył w końcu Hawking). Pole powierzchni horyzontu czarnej dziury o promieniu 7,5 centymetra, wyrażone w jednostkach Plancka, wynosi $4\pi(7{,}5\text{ cm}/1{,}6 \times 10^{-33}\text{ cm})^2 = 2{,}76 \times 10^{68}$. Czwarta część tej liczby jest równa entropii $S = 6{,}9 \times 10^{67}$. Określony wzrost entropii (wzrost nieporządku) odpowiada destrukcji określonej ilości informacji. Liczba bitów informacji odpowiadających entropii S jest równa S/ln 2. Logarytm naturalny z liczby 2 (zapisany we wzorze jako „ln 2”) wynosi 0,69. Liczba 2 pojawia się, ponieważ jeden bit informacji stanowi odpowiedź na pytanie typu tak-nie, która ma dwie możliwe wartości (gra w dwadzieścia pytań, w której odpowiadamy na 20 pytań typu tak-nie, daje ci 20 bitów informacji. Jeżeli wiesz, że mam na myśli liczbę z zakresu od 1 do 2^{20}, czyli około miliona, twoje pierwsze pytanie powinno brzmieć: „czy jest w górnej połowie?”. Jeżeli w kolejnych pytaniach będziesz dzielić kolejne zakresy na połowy, to po dwudziestu pytaniach zgadniesz moją liczbę). Zatem powstanie czarnej dziury o promieniu 7,5 centymetra stanowi wzrost nieporządku we Wszechświecie równoważny destrukcji 10^{68} bitów informacji. Istnieje 2^(10^68) różnych sposobów, aby zrobić taką czarną dziurę; ich opis wymaga 10^{68} bitów informacji. Gdy czarna dziura powstaje, ta informacja zostaje utracona. Gdyby twardy dysk o promieniu 7,5 centymetra zawierał więcej niż 10^{68} bitów informacji, to więcej niż 10^{68} bitów informacji zostałoby utraconych w sytuacji, gdy dysk ulega kolapsowi (czyli gdy ściskasz go do coraz mniejszych rozmiarów, aż powstanie czarna dziura mniejsza niż 7,5 centymetra). Ale to nie jest możliwe — gdy powstaje czarna dziura i utracone zostaje więcej niż 10^{68} bitów informacji, to ta czarna dziura musi mieć promień większy niż 7,5 centymetra. Dochodzimy do sprzeczności. W rzeczywistości, gdy próbujesz upakować coraz więcej informacji w twardym dysku o promieniu 7,5 centymetra, jego masa rośnie, a gdy dysk będzie zawierał 10^{68} bitów informacji, masa dysku będzie równa 8,4 masy Ziemi i dysk zapadnie się, tworząc czarną dziurę. W rezultacie 10^{68} bitów informacji

($1{,}16 \times 10^{58}$ gigabajtów) stanowi górną granicę ilości informacji, jaką można zapisać na dysku o średnicy 6 cali.

Literatura uzupełniająca

Abbott E.A., *Flatlandia czyli Kraina Płaszczaków: powieść o wielu wymiarach*, przeł. Jacek Dziedzic, Gdańsk, Gdańskie Wydawnictwo Oświatowe, 1997.

Bienen H.S., Walle N. van de, *Of Time and Power*, Stanford, CA, Stanford University Press, 1991.

Brown M., *How I Killed Pluto and Why It Had It Coming*, New York, Spiegel & Grau/Random House, 2010.

Ferris T., *Cały ten kram: raport o stanie wszechświata(ów)*, przeł. Maciej Kubicki, Poznań, Dom Wydawniczy Rebis, 1999.

Feynman R., *Charakter praw fizycznych*, przeł. Piotr Amsterdamski, Warszawa, Prószyński i S-ka, 2000.

Gamow G., *One, Two, Three... Infinity*, New York, Dover, 1947.

Goldberg D., *Wszechświat w lustrzanym odbiciu: jak ukryte symetrie kształtują naszą rzeczywistość*, przeł. Tomasz Krzysztoń, Warszawa, Prószyński Media, 2015.

Goldberg D., Blomquist J., *A User's Guide to the Universe*, Hoboken, NJ, Wiley, 2010.

Gott J. Richard, *Time Travel in Einstein's Universe*, Boston, Houghton Mifflin, 2001.

Gott J. Richard, Kosmiczna pajęczyna: tajemnicza struktura Wszechświata, przeł. Urszula i Mariusz Seweryńscy, Warszawa, Prószyński i S-ka, 2018.

Gott J. Richard, Vanderbei R.J., *Sizing Up the Universe*, Washington, DC, National Geographic, 2010.

Gould S.J., *Wonderful Life*, New York, W.W. Norton, 1989.

Greene B., *Piękno Wszechświata: superstruny, ukryte wymiary i poszukiwania teorii ostatecznej*, przeł. Ewa L. Łokas, Bogumił Bieniok, Poznań, Zysk i S-ka Wydawnictwo, 2018.

Hawking S.W., *Krótka historia czasu: od wielkiego wybuchu do czarnych dziur*, przeł. Piotr Amsterdamski, Poznań, Zysk i S-ka Wydawnictwo, 2015.

Kaku M., *Hiperprzestrzeń: wszechświaty równoległe, pętle czasowe i dziesiąty wymiar*, przeł. Ewa L. Łokas, Bogumił Bieniok, Warszawa, Prószyński i S-ka, 2005.

Lemonick M.D., *The Light at the Edge of the Universe*, New York, Villard Books/Random House, 1993.

Lemonick M.D., *The Georgian Star*, New York, W.W. Norton, 2009.

Lemonick M.D., *Mirror Earth*, New York, Walker & Company, 2012.

Leslie J., *The End of the World*, London, Routledge, 1996.

Misner C.W., Thorne K.S., Wheeler J.A., *Gravitation*, San Francisco, Freeman, 1973.

Novikov I.D., *The River of Time*, Cambridge, Cambridge University Press, 1998.

Ostriker J.P., Mitton S., *Jądro ciemności: ciemna materia, ciemna energia i niewidzialny Wszechświat*, przeł. Bogumił Bieniok, Ewa L. Łokas, Warszawa, Prószyński Media, 2015.

Peebles P.J.E., Page L.A. Jr., Partridge R.B., *Finding the Big Bang*, Cambridge, Cambridge University Press, 2009.

Pickover C.A., *Istoty pozaziemskie a współczesna nauka*, przeł. Jerzy Lewiński, Warszawa, „Amber", 2001.

Rees M.J., *Nasz kosmiczny dom*, przeł. Piotr Rączka, Warszawa, Prószyński i S-ka, 2006.

Rees M.J. (red.), *Universe*, wyd. popr., New York, DK Publishing, 2012.

Sagan C., *Kosmos*, wprow. Ann Druyan, przeł. Maria Duch, Bronisław Rudak, Poznań, Zysk i S-ka Wydawnictwo, 2016.

Shu F., *The Physical Universe*, Sausalito, CA, University Science Books, 1982.

Taylor E.F., Wheeler J.A., *Fizyka czasoprzestrzeni*, przeł. Barbara Pierzchalska, Warszawa, Państowe Wydawnictwo Naukowe, 1972.

Thorne K.S., *Czarne dziury i krzywizny czasu: zdumiewające dziedzictwo Einsteina*, przeł. Danuta Czyżewska, Warszawa, Prószyński i S-ka, 2004.

Tyson N. deG., *Kosmiczne zachwyty*, przeł. Dominika Braithwaite, Kraków, Insignis Media, 2018.

Tyson N. deG., *The Pluto Files: The Rise and Fall of America's Favorite Planet*, New York, W.W. Norton, 2009.

Tyson N. deG., *Space Chronicles*, New York, W.W. Norton, 2012.

Tyson N. deG., Goldsmith D., *Origins*, New York, W.W. Norton, 2004.

Tyson N. deG., Liu C.T.-C., Irion R., *One Universe*, New York, John Henry Press, 2000.

Vilenkin A., *Many Worlds in One*, New York, Hill and Wang/Farrar, Straus and Giroux, 2006.

Wells H.G., *Wehikuł czasu*, przeł. Feliks Wermiński, przekł. zweryfikował i oprac. Juliusz K. Palczewski, Wrocław, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, 1985.

Zubrin R.M., Wagner R., *Czas Marsa: dlaczego i w jaki sposób musimy skolonizować Czerwoną Planetę*, przeł. Leszek Kallas, Warszawa, Prószyński i S-ka, 1997.

Podziękowania tłumacza

Podobnie jak sama książka Welcome to the Universe, tłumaczenie także powstało dzięki ciężkiej pracy wielu ludzi. Po pierwsze, chciałbym podziękować mojej żonie, Halinie, która nie tylko zapewniła mi produktywną i przyjazną atmosferę pracy, ale także wspierała mnie na każdym etapie tłumaczenia.

Na moją szczególną wdzięczność zasługują konsultanci naukowi, Sławomir Brzezowski oraz Lech Sokołowski, których uwagi przyczyniły się do powstania ostatecznej wersji tłumaczenia. Większość przypisów w polskim wydaniu powstała z ich inspiracji.

W pracy nad tłumaczeniem korzystałem także z pomocy i konsultacji licznej grupy osób, które wspomagały mnie fachową wiedzą na różnorodne tematy, od optyki geometrycznej, przez wpływ hydrantów przeciwpożarowych na kolorystykę śniegu, po składnię siedemnastowiecznej angielszczyzny: prof. dr hab. Wojciech Gawlik (UJ), dr hab. Zdzisław Golda (UJ), prof. dr Ian P. Grant (University of Cambridge), dr hab. Leszek Hadasz (UJ), prof. dr hab. Bernard Jancewicz (UWr), mgr Marek Krośniak (UJ), dr hab. Patryk Mach (UJ), dr hab. Andrzej Odrzywołek (UJ), mgr Maria Pawłowska (UJ), prof. dr hab. Bronisław Rudak (CAMK w Toruniu), prof. dr Michael A. Strauss (Princeton University), dr hab. Grażyna Urban-Godziek (UJ), prof. dr hab. Marek Urbanik (UJ), dr hab. Iwona Węgrzyn (UJ), dr Witold Zawadzki (UJ).

Serdecznie dziękuję wszystkim wyżej wymienionym. Ostateczna wersja tłumaczenia zawdzięcza im bardzo wiele, ale odpowiedzialność za ewentualne usterki i błędy spada oczywiście na tłumacza, więc wszelkie uwagi krytyczne powinny być kierowane do mnie.

Last but not least, dziękuję redaktorom, Zofii Domańskiej i Dariuszowi Wojtczakowi, za bardzo szczegółową i uważną redakcję.