

THOMAS HERTOOG

O POCHODZENIU
CZASU

OSTATECZNA TEORIA
STEPHENA HAWKINGA

THOMAS HERTOOG

O POCHODZENIU

CZASU

OSTATECZNA TEORIA
STEPHENA HAWKINGA

PRZEŁOŻYŁ
TOMASZ LANCZEWSKI

ZYSK I S-KA
WYDAWNICTWO

Thomas Hertog
O pochodzeniu czasu. Ostateczna teoria Stephena Hawkinga

Tytuł oryginału
On the Origin of Time. Stephen Hawking's Final Theory

ISBN 978-83-8202-951-2

Copyright © 2023 by Thomas Hertog
All rights reserved
Copyright © 2023 for the Polish translation by Tomasz Lanczewski
Copyright © 2023 for this edition by Zysk i S-ka Wydawnictwo s.j., Poznań

Redaktor prowadzący
Dariusz Wojtczak

Redakcja
Zofia Domańska

Adiustacja tekstu
Agnieszka Czapczyk, Magdalena Wójcik

Indeks opracował
Bogusław Jusiak

Projekt okładki
Tobiasz Zysk

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 jakiegokolwiek postaci bez zgody właściciela praw jest zabronione.

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

Dla Nathalie

La question de l'origine cache l'origine de la question.

Pytanie o pochodzenie kryje w sobie pochodzenie pytania.

François Jacqmin

Przedmowa

Drzwi do gabinetu Stephena Hawkinga miały oliwkowozieloną barwę i chociaż znajdowały się tuż obok tętniącej życiem świetlicy, lubił, gdy były lekko uchylone. Zapukałem i wszedłem, mając wrażenie, jakbym został przeniesiony do ponadczasowego świata kontemplacji.

Stephen siedział bezgłośnie za biurkiem, twarzą do wejścia, z głową zbyt ciężką, by utrzymać ją prosto, opartą o zagłówek wózka inwalidzkiego. Powoli podniósł oczy i przywitał mnie uśmiechem, jak gdyby przez cały czas mnie oczekiwał. Jego pielęgniarka wskazała mi miejsce obok niego. Spojrzałem na komputer na biurku. Wygaszacz ekranu przewijał nieustannie przez cały ekran słowa: *Odważnie iść tam, gdzie Star Trek boi się zapuszczać.*

Była połowa czerwca 1998 roku. Znajdowaliśmy się w czeluściach labiryntu DAMTP, słynnego Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics (Wydziału Matematyki Stosowanej i Fizyki Teoretycznej) Uniwersytetu w Cambridge. DAMTP mieścił się w wiktoriańskim budynku na terenie starej tłoczni nad brzegiem rzeki Cam i przez prawie trzy dekady służył jako twierdza Stephena, siedziba jego naukowych przedsięwzięć. To tutaj, przykuty do wózka inwalidzkiego, nie mogąc unieść nawet palca, usiłował namiętnie nagiąć kosmos do swojej woli.

Współpracownik Stephena, Neil Turok, przekazał mi, że mistrz chce się ze mną widzieć. To właśnie inspirujący kurs Turoka, część słynnego zaawansowanego wykładu z matematyki na DAMTP, niedługo przedtem rozniecił moje zainteresowanie kosmologią. Wyglądało na to, iż Stephen dowiedział się, że świetnie wypadłem na egzaminie, i chciał sprawdzić, czy pod jego skrzydłami mogę się stać dobrym doktorantem.

Zakurzony, stary gabinet Stephena, wypełniony po brzegi książkami i artykułami naukowymi, wydał mi się przytulny. Miał wysoki sufit i wielkie

okno, które, jak się później dowiedziałem, otwierano nawet w mroźne zimowe dni. Na ścianie obok drzwi wisiał portret Marilyn Monroe, poniżej oprawiona i podpisana fotografia Hawkinga grającego w pokera z Einsteinem i Newtonem na holodoku Enterprise. Na ścianie po prawej stronie znajdowały się dwie tablice zapisane matematycznymi symbolami. Jedna zawierała świeże obliczenia związane z najnowszą teorią Neila i Stephena dotyczącą pochodzenia wszechświata, natomiast rysunki i wzory obecne na drugiej pojawiły się już na początku lat osiemdziesiątych. Czy mogły to być jego ostatnie odręczne notatki?¹

Ciche kliknięcie przerwało ciszę. Stephen zaczął mówić. Straciwszy swój naturalny głos w wyniku tracheotomii po przejściu zapalenia płuc ponad dekadę wcześniej, teraz komunikował się za pomocą bezosobowego głosu generowanego komputerowo. Był to powolny i pracochłonny proces.

Ostatkiem sił wykrzesanych ze swych zanikłych mięśni delikatnie nacisnął przypominające mysz komputerową urządzenie do klikania, które zostało starannie zaprojektowane do jego prawej dłoni. Ekran przymocowany do podłokietnika jego wózka podświetlił się, tworząc wirtualne połączenie między jego umysłem a światem zewnętrznym.



II. 1. Ta tablica wisiała w gabinecie Stephena Hawkinga na Uniwersytecie w Cambridge jako pamiątka z konferencji dotyczącej supergrawitacji, którą

zwołał w czerwcu 1980 roku. Wypełniona notatkami, rysunkami i równaniami, jest w równym stopniu dziełem sztuki, co spojrzeniem w abstrakcyjny wszechświat fizyków teoretycznych. Hawking jest narysowany na środku u dołu, plecami do nas (zob. też fot. 10 na wklejce)².

Stephen używał programu komputerowego o nazwie Equalizer, który miał wbudowaną bazę słów i syntezy mowy. Sprawiał wrażenie, że instynktownie porusza się po elektronicznym słowniku Equalizera, rytmicznie naciskając pilot, jakby tańczył w takt swych fal mózgowych. Menu na ekranie wyświetlało wiele często używanych słów oraz litery alfabetu. Baza danych programu zawierała żargon fizyki teoretycznej, a program przewidywał wybór następnych słów, wyświetlając pięć opcji w dolnym wierszu menu. Niestety, dobór wyrazów opierał się na elementarnym algorytmie wyszukiwania, który nie odróżniał ogólnej konwersacji od fizyki teoretycznej, czasami dając zabawne wyniki, od kosmicznego mikrofalowego risotto po dodatkowe wymiary seksualne.

Na ekranie poniżej menu pojawił się napis: *Andrei uważa*. Spokojnie wyczekując dalszego ciągu, miałem gorącą nadzieję, że będę w stanie zrozumieć to, co zaraz się pojawi. Minutę lub dwie później Stephen skierował kursor na ikonę „Mów” w lewym górnym rogu ekranu i przemówił swym elektronicznym głosem: *Andrei uważa, że istnieje nieskończenie wiele wszechświatów. To bulwersujące*.

Mieliśmy to — otwierająca rozmowę salwa Stephena.

Andrei to słynny amerykańsko-rosyjski kosmolog Andrei Linde, jeden z ojców teorii kosmologicznej inflacji zaproponowanej na początku lat osiemdziesiątych. Udoskonalona teoria Wielkiego Wybuchu zakłada, że wszechświat rozpoczął się krótkim epizodem superszybkiej ekspansji — inflacji. Linde zaproponował później ekstrawaganckie rozszerzenie swojej teorii, w którym inflacja tworzyła nie jeden, ale wiele wszechświatów.

Kiedyś wyobrażałem sobie wszechświat jako wszystko, co istnieje. Ale ile

tego wszystkiego jest? W modelu Lindego to, co nazywaliśmy „wszechświatem”, było zaledwie wycinkiem znacznie większego „multiświata”. Wyobrażał sobie kosmos jako ogromny pęczniejący bezmiar niezliczonych różnorodnych wszechświatów leżących daleko poza swoimi horyzontami, niczym wyspy na wiecznie rozszerzającym się oceanie. Kosmologów czekała jazda bez trzymanki. Stephen, najbardziej żądny przygód z nich wszystkich, zwrócił na to uwagę.

— Po co zajmować się innymi wszechświatami? — zapytałem.

Odpowiedź Stephena była enigmatyczna. *Bo obserwowany przez nas wszechświat wydaje się zaprojektowany* — odpowiedział. Potem kliknął dalej: *Dlaczego wszechświat jest taki, jaki jest? Dlaczego my tu jesteśmy?*

Żaden z moich wykładowców fizyki nigdy nie mówił o fizyce i kosmologii, używając tak metafizycznej terminologii.

— Czy to nie kwestia filozoficzna? — spytałem.

Filozofia jest martwa — powiedział Stephen, którego iskrzące oczy wyrażały gotowość do dyskusji. Nie byłem jeszcze całkiem przygotowany, ale nie mogłem się oprzeć wrażeniu, że jak na kogoś, kto wyrzekł się filozofii, Stephen stosował ją swobodnie — i twórczo — w swej pracy.

W Stephenie było coś magicznego. Jednym ruchem, zaledwie drobnym drgnieniem tak bardzo ożywił naszą rozmowę. Emanował magnetyzmem i charyzmą, które rzadko było mi dane spotykać. Jego szeroki uśmiech i pełna wyrazu twarz, jednocześnie ciepła i wesoła, sprawiały, że nawet generowany komputerowo głos wybrzmiewał pełnią osobowości i wciągał mnie coraz głębiej w rozważane przez niego kosmiczne tajemnice.

Podobnie jak wyrocznia delficka, opanował sztukę przekazywania wielu informacji w kilku słowach. Wynikiem tego był unikatowy sposób myślenia i mówienia o fizyce oraz, jak postaram się opisać, całkiem nowa fizyka. Ale ta zwięzłość oznaczała również, że nawet niewielki problem podczas klikania, taki jak pojedyncze brakujące słowo — na przykład „nie” — mógł prowadzić

i często prowadził do frustracji i zamieszania. Jednak tego popołudnia nie miałem nic przeciwko pogrążeniu się w zamieszaniu i byłem wdzięczny, że korzystanie przez Stephena z Equalizera dało mi czas na zastanowienie się nad moimi odpowiedziami.

Kiedy Stephen powiedział, iż wszechświat wydaje się zaprojektowany, miał na myśli niezwykłą obserwację, że wyłonił się z gwałtownych narodzin doskonale przygotowany do podtrzymania życia — nawet miliardy lat później. Ten oczywisty fakt w taki czy inny sposób od wieków trapił uczonych, ponieważ najwyraźniej stanowi poważny kłopot. To niemal tak, jak gdyby geny życia i kosmosu były ze sobą splecione, jakby kosmos od początku wiedział, że kiedyś stanie się naszym domem. Jak mamy rozumieć to tajemnicze pojawienie się celowości? To jedno z głównych pytań dotyczących wszechświata, które zadaje sobie ludzkość, a Stephen był głęboko przekonany, że teoria kosmologiczna ma coś do powiedzenia na ten temat. Perspektywa — lub oczekiwanie — tego, że uda mu się rozwiązać zagadkę kosmicznego projektu, stanowiła istotną siłę napędową jego pracy.

To samo w sobie było wyjątkowe. Większość fizyków wołała nie podejmować tak trudnych, pozornie filozoficznych zagadnień. Albo wierzyła, że misternie wykonana architektura wszechświata pewnego dnia wyłoni się z eleganckiej zasady matematycznej stanowiącej podstawę teorii wszystkiego. Gdyby tak było, pozorny projekt wszechświata wydawałby się szczęśliwym zbiegiem okoliczności, przypadkową konsekwencją obiektywnych i bezosobowych praw natury.

Ale ani Stephen, ani Andrei nie byli zwykłymi fizykami. Nie chcąc kierować się pięknem abstrakcyjnej matematyki, czuli, że zagadkowe precyzyjne dostrojenie wszechświata, które zrodziło życie, prowadzi do głębokiego problemu u podstaw fizyki. Nie zadowolając się jedynie stosowaniem praw przyrody, szukali szerszego spojrzenia na fizykę, które uwzględniało stawianie pytań dotyczących samego pochodzenia praw. To skłoniło ich do rozmyślań nad Wielkim Wybuchem, którego projekt pojawił

się prawdopodobnie właśnie w momencie narodzin wszechświata. I to właśnie w kwestii tego momentu narodzin Stephen i Andrei zdecydowanie się nie zgadzali.

Andrei wyobrażał sobie kosmos jako gigantyczną, rozdymającą się przestrzeń, w której wiele wielkich wybuchów nieustannie wytwarza nowe wszechświaty, każdy z własnymi właściwościami fizycznymi, tak jakby te ostatnie były niczym więcej niż naszą lokalną kosmiczną pogodą. Twierdził, że nie powinno nas dziwić, iż znaleźliśmy się w niezwykłym wszechświecie dostosowanym do pojawienia się życia, ponieważ w oczywisty sposób nie moglibyśmy istnieć w jednym z wielu wszechświatów, w których życie jest niemożliwe. Jakiegokolwiek wrażenie wielkiego projektu stojącego za tym wszystkim byłoby iluzją w multiświecie Lindego, wynikającą z naszej ograniczonej wizji kosmosu.

Stephen z kolei uważał, że wielkie kosmiczne rozszerzenie Lindego prowadzące od wszechświata do multiświata było metafizyczną fantazją, która niczego nie wyjaśnia, chociaż wyczuwałem, że nie potrafi tego do końca uzasadnić. Niemniej uznałem za intrygujące i ekscytujące to, że najwybitniejsi kosmolodzy świata, choć zdecydowanie się ze sobą nie zgadzali, dyskutowali nad tymi fundamentalnymi kwestiami z tak wielkim przekonaniem.

— Czy Linde nie odwołuje się do zasady antropicznej, czyli warunku, że istniejemy, aby wybrać przyjazny życiu wszechświat w ramach multiświata?
— mówiłem dalej.

Stephen przewrócił oczami, spojrzał na mnie i lekko poruszył ustami. Byłem zdezorientowany. Później dowiedziałem się, że oznaczało to, iż się nie zgadzał. Kiedy zdał sobie sprawę, że nie zostałem wprowadzony w rodzaj niewerbalnej komunikacji praktykowanej w jego wewnętrznym kręgu, przesunął wzrok z powrotem na ekran i zaczął konstruować zupełnie nowe zdanie. W istocie dwa zdania.

Zasada antropiczna to głos rozpaczy — napisał, a moje zmieszanie

narastało w rytm jego klikania. *Jest to zaprzeczenie naszych nadziei na zrozumienie ukrytego porządku wszechświata za pomocą nauki.*

Cóż, to było zaskakujące. Po przeczytaniu *Krótkiej historii czasu* doskonale zdawałem sobie sprawę, że wczesny Hawking często flirtował z zasadą antropiczną jako sposobem na częściowe wyjaśnienie wszechświata. Jako kosmolog z powołania Stephen wcześniej zauważył osobliwe związki między wielkoskalowymi właściwościami fizycznymi wszechświata a istnieniem życia. Już na początku lat siedemdziesiątych przedstawił argument antropiczny — jak się okazało, błędny — wyjaśniający, dlaczego ekspansja wszechświata przebiegała w tym samym tempie we wszystkich trzech kierunkach przestrzeni³. Czy zmienił zdanie na temat zalet rozumowania antropicznego w kosmologii?

Kiedy Stephen zrobił sobie przerwę medyczną, aby oczyścić tchawicę, rozejrzałem się po jego gabinecie. Egzemplarze *Krótkiej historii czasu* przetłumaczone na egzotyczne języki stały wysoko na półce rozciągającej się przez całą długość ściany po lewej stronie. Zastanawiałem się, co jeszcze tam się znajdowało, pod czym już dziś by się nie podpisał. Obok tych książek zauważyłem sporo prac doktorskich jego byłych doktorantów. Na początku lat siedemdziesiątych Stephen założył w Cambridge słynną szkołę myślenia, która zawsze obejmowała niewielki krąg zmieniających się doktorantów i stażystów.

Tytuły rozpraw dotyczyły najgłębszych pytań, z jakimi zmagala się fizyka końca XX wieku. Widziałem tam pracę *Gravity: A Quantum Theory?* [Grawitacja: teoria kwantowa?] Briana Whitta, a także *Time and Quantum Cosmology* [Czas i kosmologia kwantowa] Raymonda Laflamme'a — obie z lat osiemdziesiątych. Praca *Spacetime Wormholes and the Constants of Nature* [Tunele czasoprzestrzenne i stałe przyrody] Faya Dowkera przeniosła mnie do wczesnych lat dziewięćdziesiątych, kiedy Stephen i jego koledzy uważali, że tunele czasoprzestrzenne — geometryczne pomosty w przestrzeni — wpływają na właściwości cząstek elementarnych. (Przyjaciół Stephen, Kip

Thorne, wykorzystał później tunele czasoprzestrzenne w filmie *Interstellar*, aby sprowadzić Coopera z powrotem do Układu Słonecznego). Po prawej stronie Faya stały *Problems in M Theory* [Problemy w M-teorii] Mariki Taylor, najmłodszej akademickiej wychowanki Stephena. Marika pracowała pod kierownictwem Stephena w połowie drugiej rewolucji strunowej, kiedy teoria ta przekształciła się w znacznie większy projekt, znany jako M-teoria, a Stephen w końcu zaczął się przekonywać do tego pomysłu.

Na samym końcu półki po lewej stronie stały dwa egzemplarze starszej książki z grubą zieloną okładką, *Properties of Expanding Universes* [Właściwości rozszerzających się wszechświatów]. Była to rozprawa doktorska Stephena sięgająca połowy lat sześćdziesiątych XX wieku, kiedy duża tubowa antena radiowa w Bell Telephone Labs odebrała pierwsze echo gorącego Wielkiego Wybuchu w postaci słabego promieniowania mikrofalowego. Stephen udowodnił w swojej pracy doktorskiej, że jeśli teoria grawitacji Einsteina była słuszna, to samo istnienie tych sygnałów oznacza, iż czas musiał mieć początek. Jak to się miało do multiświata Lindego, o którym właśnie mówiliśmy?

Zaraz na prawo od pracy Stephena dostrzegłem *Gravitational Radiation and Gravitational Collapse* [Promieniowanie grawitacyjne i kolaps grawitacyjny] Gary'ego Gibbonsa. Był on pierwszym doktorantem Stephena na początku lat siedemdziesiątych, gdy amerykański fizyk Joe Weber twierdził, że odkrył sygnały fal grawitacyjnych pochodzące z centrum Drogi Mlecznej. Rzekomo zaobserwowane przez niego natężenie promieniowania grawitacyjnego było tak wysokie, że galaktyka traciłaby masę w tempie, którego nie można było utrzymać przez eony — gdyby to była prawda, wkrótce nie istniałaby już żadna galaktyka. Urzeczony tym paradoksem Stephen i Gary rozważali pomysł zbudowania własnego detektora fal grawitacyjnych w podziemiach DAMTP. Była to droga prowadząca donikąd; pogłoski o falach grawitacyjnych okazały się nieprawdziwe i minęło kolejne czterdzieści lat, zanim LIGO, obserwatorium interferometrii laserowej fal

grawitacyjnych, w końcu zdołało wykryć te nieuchwytne falujące drgania czasoprzestrzeni.

Stephen zwykle co roku przyjmował nowego doktoranta, który pracował z nim nad jednym z jego projektów wysokiego ryzyka związanym z czarnymi dziurami — zapadniętymi gwiazdami ukrytymi za horyzontem — albo z Wielkim Wybuchem. Starał się realizować to naprzemiennie, przydzielając jednego studenta do pracy nad czarnymi dziurami, a następnego do pracy nad Wielkim Wybuchem, tak aby w każdym momencie krąg jego doktorantów zajmował się oboma wątkami prowadzonych przez niego badań. Postępował tak dlatego, że czarne dziury i Wielki Wybuch były w jego myśleniu jak *yin* i *yang* — wiele kluczowych spostrzeżeń Stephena na temat Wielkiego Wybuchu można przypisać pomysłom, które po raz pierwszy rozwinął w kontekście czarnych dziur.

Zarówno wewnątrz czarnych dziur, jak i podczas Wielkiego Wybuchu makroświat grawitacji prawdziwie łączy się z mikroświatem atomów i cząstek. W tych ekstremalnych warunkach teoria względności grawitacji Einsteina i teoria kwantowa mogłyby lepiej ze sobą współpracować. Tyle że tego nie robią i jest to powszechnie traktowane jako jeden z największych nierozwiązanych problemów w fizyce. Na przykład obie teorie wyrażają radykalnie odmienny pogląd na przyczynowość i determinizm. Podczas gdy teoria Einsteina stosuje się do determinizmu Newtona i Laplace’a, teoria kwantowa zawiera fundamentalny element niepewności i losowości, a zachowuje tylko okrojone pojęcie determinizmu, mniej więcej połowę tego, o czym myślał Laplace. Przez lata grupa Stephena zajmująca się grawitacją i jej sprzymierzeńcy uczynili więcej niż jakakolwiek grupa badawcza na świecie, aby ujawnić głębokie dylematy pojęciowe, pojawiające się w chwili podjęcia próby połączenia pozornie sprzecznych zasad tych dwóch teorii fizycznych w jedną harmonijną strukturę.

Tymczasem Stephen został „ogarnięty”, cytując słowa jego pielęgniarki, i znów zaczął klikać.

Chcę, żebyś pracował ze mną nad kwantową teorią Wielkiego Wybuchu...
— Najwyraźniej przybyłem w roku Wielkiego Wybuchu. — ...*aby uporządkować multiświat*. Spojrzał na mnie z szerokim uśmiechem, a jego oczy znów zabłyśły. To było to. Nie przez filozofowanie czy odwoływanie się do zasady antropicznej, ale przez wplatanie teorii kwantowej w głębsze warstwy kosmologii zamierzaliśmy poradzić sobie z multiświatem. Sposób, w jaki to zakomunikował, sprawiało, że brzmiało to jak zwykłe zadanie domowe, i chociaż mogłem wyczytać z jego twarzy, że już zaczęliśmy pracę, nie miałem pojęcia, w jakim kierunku zmierza statek kosmiczny Hawking.

Na ekranie pojawiło się: *Umieram...*

Zmroziło mnie. Spojrzałem na pielęgniarkę, która była pochłonięta lekturą w kącie gabinetu. Spojrzałem znów na Stephena, który według mnie był w dobrym stanie i klikał dalej:

...z tęsknoty... za... filiżanką... herbaty.

Byliśmy przecież w Wielkiej Brytanii i właśnie wybiła godzina szesnasta⁴.

Wszechświat czy multiświat? Projekt(ant) czy nie? To brzemienne w skutki pytanie będzie nas zajmować przez dwadzieścia lat. Jedno zadanie domowe doprowadziło do kolejnego i wkrótce Stephen i ja znaleźliśmy się w samym środku jednej z najgorętszych debat w fizyce teoretycznej pierwszej połowy XXI wieku. Niemal każdy miał własne zdanie na temat multiświata, choć nikt do końca nie wiedział, co o tym wszystkim myśleć. To, co rozpoczęło się jako projekt doktorski pod jego kierunkiem, przekształciło się w fantastycznie intensywną współpracę, która zakończyła się dopiero wraz ze śmiercią Stephena 14 marca 2018 roku.

Stawką naszej pracy było nie tylko zrozumienie natury Wielkiego Wybuchu, tej zagadki w sercu istnienia, ale także głębsze znaczenie samych praw przyrody. Czego ostatecznie kosmologia uczy nas o świecie? Jak my do niego pasujemy? Takie rozważania wyprowadzają fizykę daleko poza jej strefę komfortu. Jednak właśnie tam lubił się zapuszczać Stephen — gdzie

jego niezrównana intuicja, wyrobiona przez dziesięciolecia głębokiego kosmologicznego myślenia, okazywała się prorocza.

Podobnie jak wielu uczonych przed nim, wczesny Hawking uważał podstawowe prawa fizyki za niezmiennie, ponadczasowe prawdy. „Gdy odkryjemy kompletną teorię [...], poznamy wtedy myśli Boga” — napisał w *Krótkiej historii czasu*. Jednak ponad dziesięć lat później podczas naszego pierwszego spotkania zorientowałem się, że czując konkurencję w postaci multiświata Lindego, znalazł niedociągnięcia w tym stwierdzeniu. Czy fizyka naprawdę dostarcza boskich praw działających na początku czasu podczas Wielkiego Wybuchu? Czy potrzebujemy takich praw?

Wkrótce mieliśmy odkryć, że wahadło platońskie w fizyce teoretycznej wychyliło się zbyt mocno. Kiedy prześledzimy historię wszechświata od jego najwcześniejszych chwil, dostrzeżemy głębszy poziom ewolucji, na którym same prawa fizyczne ulegają zmianie i ewoluują w ramach pewnego rodzaju metaewolucji. Prawa fizyki przekształcają się w pierwotnym wszechświecie w procesie losowej zmienności i selekcji, podobnie jak w ewolucji darwinowskiej, z zanikającymi w momencie Wielkiego Wybuchu rodzajami cząstek, siłami, a nawet — naszym zdaniem — czasem. Stephen i ja zaczęliśmy jeszcze bardziej stanowczo uważać Wielki Wybuch nie tylko za początek czasu, ale także za początek praw fizycznych. W centrum naszej kosmogonii leży nowa fizyczna teoria pochodzenia, która, jak zdaliśmy sobie sprawę, jednocześnie obejmuje pochodzenie tej teorii.

Praca ze Stephenem była podróżą nie tylko ku granicom przestrzeni i czasu, ale także w głąb jego umysłu — do tego, co sprawiało, że Stephen był tym, kim był. Nasza wspólna misja zbliżyła nas do siebie. Był prawdziwym poszukiwaczem. Pracując z nim, wyraźnie mogłem odczuć jego determinację i epistemiczny optymizm wynikające z faktu, że potrafimy się mierzyć z tajemniczymi kosmicznymi pytaniami. Stephen sprawił, że obaj czuliśmy się, jakbyśmy pisali własną historię stworzenia, co w pewnym sensie uczyniliśmy.

A fizyka była zabawą! Ze Stephenem nigdy do końca nie dało się

przewidzieć, kiedy kończy się praca, a zaczyna impreza. Nienasyconej pasji zrozumienia dorównywały tylko jego radość życia i duch przygody. W kwietniu 2007 roku, kilka miesięcy po swoich sześćdziesiątych piątym urodzinach, wziął udział w locie w stanie nieważkości na pokładzie specjalnie wyposażonego boeinga 727, które to wydarzenie traktował jako preludium do podróży w kosmos. A tymczasem jego lekarze wpadali w panikę, że jedzie przez kanał La Manche pociągiem Eurostar, aby odwiedzić mnie w Belgii.

Mimo utraty na zawsze swego naturalnego głosu i mimo słabości, która uniemożliwiała ruszenie choćby palcem, stał się największym popularyzatorem nauki naszych czasów. Zainspirowany głębokim poczuciem, że jesteśmy częścią wielkiego planu zapisanego na niebie i pozostawionego nam do rozwikłania, dzielił się swoją radością odkrywania z publicznością na całym świecie. W trakcie naszej współpracy napisał książkę *Wielki projekt*, która odzwierciedla naszą dezorientację w tamtym czasie. Stephen ukazuje się w niej jako zwolennik zasady antropicznej, multiświata i idei ostatecznej teorii wszystkiego, aż do jej rywalizacji z wszechświatem stworzonym przez Boga. Ale *Wielki projekt* zawiera też pierwsze ślady nowego paradygmatu kosmologicznego, który wykrystalizował się w naszej pracy kilka lat później. Na krótko przed śmiercią Stephen powiedział mi, że nadszedł czas na nową książkę. Oto ona. W kilku następnych rozdziałach opiszę naszą podróż z powrotem do Wielkiego Wybuchu oraz sposób, w jaki doprowadziła ostatecznie Hawkinga do odrzucenia koncepcji multiświata i zastąpienia go intrygującą nową perspektywą pochodzenia czasu, głęboko darwinowską w swym duchu i charakterze oraz dającą radykalnie nowe spojrzenie na wielki kosmiczny projekt.

Często w naszych wysiłkach towarzyszył nam amerykański fizyk Jim Hartle, wieloletni współpracownik Stephena, z którym na początku lat osiemdziesiątych prowadził pionierskie prace w dziedzinie kosmologii kwantowej. Z biegiem lat ten duet wykazał prawdziwy talent do patrzenia na wszechświat przez soczewkę kwantową. Nawet używany przez nich język

uosabiał ich myślenie kwantowe, jak gdyby komunikowali się w inny sposób. Na przykład w przypadku słowa „wszechświat” kosmolodzy zwykle mają na myśli gwiazdy, galaktyki i ogromną przestrzeń wokół nas. Kiedy Jim czy Stephen używali tego określenia, mieli na myśli abstrakcyjny wszechświat **k w a n t o w y**, skąpany w nieoznaczoności, ze wszystkimi możliwymi historiami istniejącymi w pewnego rodzaju superpozycji. Ale to właśnie ich w pełni kwantowe spojrzenie doprowadziło w końcu do prawdziwej rewolucji darwinowskiej w kosmologii. Późniejszy Hawking potraktował teorię kwantową poważnie — naprawdę bardzo poważnie — i postanowił wykorzystać ją do rozważań nad wszechświatem w największych skalach. Kosmologia kwantowa będzie tą dziedziną badań, w której Stephen pozostanie w czołówce do końca swoich dni.

Kiedy Hawking po paru latach naszej współpracy stracił resztki sił w dłoni i nie mógł już dłużej naciskać pilota pozwalającego mu prowadzić rozmowę, zaczął korzystać z czujnika zamontowanego na okularach, uruchamianego poprzez lekkie ruchy policzkiem. Ale w końcu i to stało się zbyt trudne. Komunikacja spowolniła, z kilku słów na minutę do kilku minut na słowo, po czym praktycznie całkowicie zamilkł, podczas gdy zapotrzebowanie na jego słowa gwałtownie wzrosło⁵. Oto najsłynniejszy na świecie apostoł nauki niezdolny do mówienia. Ale Stephen nie miał zamiaru się poddać. Dzięki naszej intelektualnej więzi pogłębionej przez lata bliskiej współpracy wychodziliśmy coraz bardziej poza komunikację werbalną. Pomijając Equalizer, czujniki i piloty, stawałem przed nim, wyraźnie w jego polu widzenia, i sondowałem jego umysł, zadając pytania. Oczy Stephena błyszczały jasno, kiedy moje argumenty współgrały z jego intuicją. Następnie opieraliśmy się na tej więzi, wykorzystując w odpowiedni sposób wspólny język i wzajemne zrozumienie wypracowane przez lata. To z tych „rozmów” powoli, lecz systematycznie wyłaniała się jego ostateczna teoria wszechświata.

W nauce zdarzają się krytyczne momenty, kiedy na pierwszy plan wysuwają

się rozważania metafizyczne, czy nam się to podoba, czy nie. Na takich rozstajach dróg dowiadujemy się czegoś głębokiego nie tylko o funkcjonowaniu natury, ale też o warunkach, dzięki którym nasza działalność naukowa jest możliwa i wartościowa, a także o światopoglądzie, jaki nasze odkrycia mogą kształtować. Dążenie fizyków do zrozumienia tego, co sprawia, że wszechświat jest dopasowany do pojawienia się życia, doprowadziło nas do jednego z takich krytycznych rozwidleń. Jest to bowiem w istocie kwestia humanistyczna, znacznie szersza niż nauka. Tu chodzi o **n a s z e** początki. Jądro ostatecznej teorii wszechświata Stephena pozwala na wyjątkowo silną refleksję na temat tego, co to znaczy być ludźmi w przyjaznym życiu kosmosie i sprawować funkcję zarządców planety Ziemia. Już nawet tylko z tego powodu może ona ostatecznie okazać się jego największą nauką spuścizną.

UWAGA OD AUTORA

W moją relację wplotłem fragmenty licznych rozmów, jakie odbyłem ze Stephenem na przestrzeni dwudziestu lat. Do wypowiedzi Hawkinga, które ukazały się w publikacjach, odsyłam natomiast w przypisach na końcu książki.

¹ Po śmierci Stephena tablica została nabyta jako dobro narodowe przez London Science Museum Group wraz z innymi pamiątkami z gabinetu Hawkinga w Cambridge. Okazuje się, że większość zapisków nie została wykonana przez Stephena, lecz przez uczestników trwającej miesiąc konferencji, w tym Martina Roceka, jej współorganizatora i stażysty podoktorskiego u Hawkinga, którego twarz znajduje się na środku tablicy (zob. fot. 10 na wklejce).

² W książce znajdują się odwołania zarówno do ilustracji wplecionych w tekst, jak również do fotografii znajdujących się na wklejce (przyp. red.).

³ Christopher B. Collins, Stephen. W. Hawking, *Why Is the Universe Isotropic?*, „Astrophysical Journal” 180 (1973), s. 317–334.

⁴ Druga przerwa w naszej rozmowie tego popołudnia miała miejsce, gdy oglądaliśmy zapowiedź odcinka serialu *Simpsonowie*, w którym pojawił się Stephen i o którego ocenę został poproszony.

⁵ Stephen od czasu do czasu używał głosu w procesie, w ramach którego ktoś sporządzał oświadczenie, które następnie było czytane przez jego syntezytor mowy i przekazywane do świata zewnętrznego. Jednak ludzie wokół niego mogli z łatwością odróżnić imitacje słów Hawkinga od prawdziwych — te ostatnie wyróżniały się zwięzłością, jasnością i charakterystycznym poczuciem humoru. Chociaż takie postępowanie było konieczne z kilku powodów, było też niefortunne, ponieważ oznaczało, że publiczny wizerunek Hawkinga stopniowo oddzielał się od realnej osoby.

ROZDZIAŁ 1

Paradoks

Es könnte sich eine seltsame Analogie ergeben, daß das Okular auch des riesigsten Fernrohrs nicht größer sein darf, als unser Auge.

Nawet największy teleskop musi mieć okular nie większy niż ludzkie oko.

LUDWIG WITGENSTEIN, *VERMISCHTE BEMERKUNGEN*

Koniec lat dziewięćdziesiątych był kulminacją złotej dekady odkryć w kosmologii. Od dawna uważana za królestwo nieskrępowanych spekulacji kosmologia — nauka na tyle śmiała, by badać pochodzenie, ewolucję i losy wszechświata jako całości — wreszcie dorastała. Naukowcy z całego świata byli podekscytowani spektakularnymi obserwacjami pochodzącymi z wyrafinowanych technicznie satelitów i instrumentów naziemnych, które przekształcały nasz obraz wszechświata w niewyobrażalny wręcz sposób. To tak, jakby wszechświat zaczął do nas przemawiać. Stanowiło to poważną konfrontację z rzeczywistością dla teoretyków, którzy musieli zapanować nad swoimi spekulacjami i uściślić przewidywania własnych modeli.

W kosmologii odkrywamy przeszłość. Kosmolodzy to podróżnicy w czasie, a teleskopy są ich wehikułami czasu. Kiedy patrzymy w daleką przestrzeń kosmiczną, spoglądamy wstecz w czasie, gdyż światło odległych gwiazd i galaktyk przebyło miliony, a nawet miliardy lat, aby do nas dotrzeć. Już w 1927 roku belgijski duchowny katolicki i astronom Georges Lemaître przewidział, że rozważana w tak długich przedziałach czasu przestrzeń się rozszerza. Ale dopiero w latach dziewięćdziesiątych zaawansowana

technologia teleskopowa umożliwiła prześledzenie historii ekspansji wszechświata.

Ta historia przyniosła pewne niespodzianki. Na przykład w 1998 roku astronomowie odkryli, że rozszerzanie przestrzeni zaczęło przyspieszać mniej więcej pięć miliardów lat temu, mimo że wszystkie znane formy materii przyciągają się grawitacyjnie i dlatego powinny spowolnić ekspansję. Od tego czasu fizycy zaczęli się zastanawiać, czy to dziwne kosmiczne przyspieszenie jest wywołane przez kosmologiczną stałą Einsteina, niewidzialną, przypominającą eter ciemną energię, która powoduje, że grawitacja odpycha, a nie przyciąga. „Wygląda na to, że wszechświat może być jak Los Angeles — zażartował któryś z astronomów — składa się w jednej trzeciej z substancji i w dwóch trzecich z ciemnej energii”.

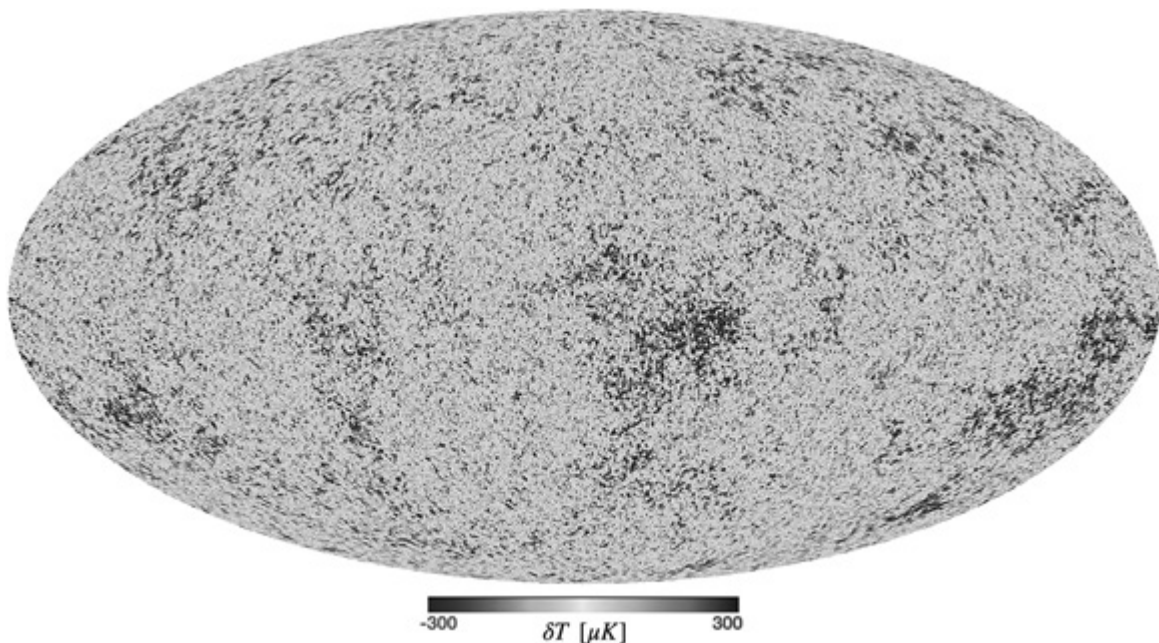
Zatem skoro wszechświat rozszerza się teraz, musiał być w przeszłości bardziej ściśnięty. Jeśli cofniemy się w kosmicznej historii — oczywiście jedynie w ramach ćwiczenia matematycznego — odkryjemy, że cała materia była kiedyś bardzo gęsto upakowana oraz bardzo gorąca, ponieważ materia nagrzewa się i promieniuje, gdy jest ściskana. Ten pierwotny stan znany jest dziś jako **g o r ą c y** Wielki Wybuch. Obserwacje astronomiczne prowadzone od złotych lat dziewięćdziesiątych określiły wiek wszechświata, czyli czas, który upłynął od Wielkiego Wybuchu, na 13,8 miliarda plus minus 20 milionów lat.

Aby się więcej dowiedzieć o narodzinach wszechświata, Europejska Agencja Kosmiczna (ESA — European Space Agency) w maju 2009 roku wystrzeliła satelitę , próbując zrealizować najbardziej szczegółowy i ambitny przegląd nocnego nieba, jaki kiedykolwiek zrealizowano. W wyniku tego powstał intrygujący wzór niejednorodności promieniowania cieplnego pozostałego po Wielkim Wybuchu. Podróżując przez rozszerzający się kosmos przez 13,8 miliarda lat, docierające do nas dzisiaj ciepło wyemitowane podczas narodzin wszechświata jest bardzo zimne: 2,725 K, czyli około -270 stopni Celsjusza.

Promieniowanie w tej temperaturze leży głównie w mikrofalowym zakresie widma elektromagnetycznego, więc to ciepło resztkowe jest znane jako **kosmiczne mikrofalowe promieniowanie tła** lub promieniowanie CMB.

Wysiłki ESA zmierzające do zarejestrowania tej pradawnej poświaty zakończyły się w 2013 roku, kiedy osobliwa, plamista ilustracja przypominająca malowidło puentylistyczne ozdobiła pierwsze strony światowych gazet. Ten obraz przedstawia ilustracja 2. Jest to rzut całego nieba, opracowany w najdrobniejszych szczegółach z milionów pikseli, prezentujący temperaturę relikтового promieniowania CMB pochodzącego z różnych kierunków w przestrzeni. Dzięki tak szczegółowym obserwacjom promieniowania CMB dysponujemy fotografią wszechświata z około 380 tysięcy lat po Wielkim Wybuchu, kiedy ochłodził się do kilku tysięcy stopni. Było wystarczająco zimno, by uwolnić to pierwotne promieniowanie, które od tego czasu bez przeszkód podróżuje przez kosmos.

Mapa nieba CMB potwierdza, że reliktoowa poświata Wielkiego Wybuchu ma niemal jednorodny, choć nie do końca idealny rozkład na całym niebie. Plamki na obrazie reprezentują drobne różnice temperatury, maleńkie niejednorodności, nie większe niż sto tysięcznych stopnia. Te bardzo małe różnice są niezwykle ważne, ponieważ stanowią pozostałość ziaren, wokół których ostatecznie uformowały się galaktyki. Gdyby gorący Wielki Wybuch był wszędzie idealnie jednorodny, dzisiaj nie byłoby galaktyk.



II. 2. Mapa nieba przedstawiająca poświatę gorącego Wielkiego Wybuchu wykonana przez satelitę Planck Europejskiej Agencji Kosmicznej, nazwanego na cześć pioniera fizyki kwantowej Maxa Plancka. Plamy o różnych odcieniach szarości reprezentują niewielkie wahania temperatury promieniowania docierającego do nas z różnych kierunków na niebie. Na pierwszy rzut oka te fluktuacje wydają się losowe, ale szczegółowe badanie wykazało, że istnieją wzorce łączące różne obszary na mapie. Badając te wzorce, kosmolodzy mogą zrekonstruować historię ekspansji wszechświata, aby modelować sposób powstawania galaktyk, a nawet przewidzieć jego przyszłość.

Fotografia pradawnego promieniowania CMB wyznacza nasz kosmologiczny horyzont: nie możemy zajrzeć jeszcze dalej. Ale z teorii kosmologicznej możemy się czegoś dowiedzieć o procesach zachodzących w jeszcze wcześniejszych epokach. Tak jak paleontolodzy dowiadują się ze skamielin, jak wyglądało kiedyś życie na Ziemi, tak kosmolodzy, rozszyfrowując wzorce zapisane w tych śladach z przeszłości, są w stanie połączyć ze sobą to, co mogło się wydarzyć, zanim reliktowa mapa ciepła została namalowana na niebie. To powoduje, że CMB odgrywa rolę kosmologicznego kamienia z Rosetty, który pozwala nam prześledzić historię

wszechświata daleko wstecz, być może nawet ułamek sekundy po jego narodzinach.

A dowiadujemy się naprawdę niesamowitych rzeczy. Jak zobaczymy w rozdziale 4, zmiany temperatury promieniowania CMB wskazują, że wszechświat początkowo szybko się rozszerzał, następnie zwolnił, a niedawno (około pięciu miliardów lat temu) ponownie zaczął przyspieszać. Spowolnienie wydaje się raczej wyjątkiem niż regułą w skali głębokiego czasu i głębokiej przestrzeni. Jest to jedna z pozornie przypadkowych, przyjaznych życiu właściwości wszechświata, ponieważ tylko w spowalniającym wszechświecie materia tworzy skupiska i gromadzi się, tworząc galaktyki. Gdyby nie dłuższy okres niemal całkowitego wyhamowania ekspansji w naszej przeszłości, nie byłoby galaktyk i gwiazd, a więc też życia.

Historia ekspansji wszechświata znalazła się w centralnym punkcie jednego z pierwszych momentów, w którym problem warunków potrzebnych do naszego istnienia pojawił się we współczesnym myśleniu kosmologicznym. Moment ten nastąpił na początku lat trzydziestych, gdy Lemaître wykonał niezwykle szkic w jednym ze swoich fioletowych notatników, przedstawiający coś, co nazwał „niezdecydowanym” wszechświatem z historią ekspansji podobną do jazdy po wybojach, która wyłoni się z obserwacji siedemdziesiąt lat później¹ (zob. fot. 3 na wklejce). Lemaître przyjął koncepcję długiej przerwy w ekspansji, rozważając możliwość pojawienia się życia we wszechświecie. Wiedział, że obserwacje astronomiczne pobliskich galaktyk wskazywały na wysokie tempo rozszerzania się w ostatnim okresie. Ale kiedy poddał wszechświat ewolucji wstecz w tym samym tempie, odkrył, że wszystkie galaktyki musiały się znajdować jedna na drugiej nie więcej niż miliard lat temu. Było to oczywiście niemożliwe, ponieważ Ziemia i Słońce są znacznie starsze. Aby uniknąć oczywistego konfliktu między historią wszechświata a historią naszego Układu Słonecznego, wyobraził sobie pośrednią erę bardzo powolnej ekspansji, by dać czas na powstanie gwiazd, planet i życia.

W kolejnych dekadach po pionierskiej pracy Lemaître'a fizycy wciąż odkrywali wiele tego rodzaju „szczęśliwych zbiegów okoliczności”. Dokonajmy niewielkiej zmiany niemal w dowolnej z jego podstawowych właściwości fizycznych, od zachowania atomów i molekuł po strukturę kosmosu w największych skalach, a możliwość pojawienia się życia we wszechświecie zawiśnie na włosku.

Weźmy pod uwagę grawitację, siłę, która rządzi wielkoskalowym wszechświatem i nadaje mu kształt. Grawitacja jest niezwykle słaba; potrzeba masy Ziemi tylko po to, byśmy mogli utrzymać stopy na podłożu. Ale gdyby grawitacja była silniejsza, gwiazdy świeciłyby jaśniej i dlatego umierałyby znacznie wcześniej, nie pozostawiając czasu na ewolucję złożonych form życia na którejkolwiek z obiegających je planet ogrzewanych ich ciepłem.

Albo rozważmy drobne zmiany o wartości jednej stutysięcznej w temperaturze relikтового promieniowania po Wielkim Wybuchu. Gdyby te różnice były nieco większe — powiedzmy około jednej dziesięciotysięcznej — większość zarodków struktur kosmicznych urosłaby do rozmiarów gigantycznych czarnych dziur, a nie do nadających się do zamieszkania galaktyk z licznymi gwiazdami. I odwrotnie, jeszcze mniejsze zmiany — jedna milionowa lub mniej — nie pozwoliłyby na powstanie żadnych galaktyk. Gorący Wielki Wybuch uczynił to w sam raz. Tak czy inaczej, wszechświat wkroczył na wyjątkowo przyjazną życiu ścieżkę, której rezultaty miały być widoczne dopiero kilka miliardów lat później. Dlaczego?

Mnóstwo jest innych przykładów takich szczęśliwych kosmicznych zbiegów okoliczności. Żyjemy we wszechświecie o trzech dużych wymiarach przestrzeni. Czy jest coś specjalnego w liczbie trzy? Jest. Dodanie tylko jednego wymiaru przestrzennego powoduje, że atomy i orbity planet są niestabilne. Ziemia poruszałaby się spiralnie w kierunku Słońca, zamiast okrążać je po stabilnej orbicie. Wszechświaty z co najmniej pięcioma dużymi wymiarami przestrzennymi prowadzą do jeszcze większych problemów. Światy z tylko dwoma wymiarami przestrzennymi mogą jednak nie zapewniać

wystarczającej ilości miejsca do funkcjonowania układów złożonych, jak pokazano na ilustracji 3. Trzy wymiary przestrzeni są w sam raz dla pojawienia się życia.

Co więcej, to zadziwiające przystosowanie do pojawienia się życia rozciąga się na właściwości chemiczne wszechświata, które są określane przez cechy cząstek elementarnych i działających między nimi sił. Na przykład neutrony są odrobinę cięższe niż protony. Stosunek masy neutronu do masy protonu wynosi 1,0014. Gdyby było odwrotnie, wszystkie protony we wszechświecie rozpadłyby się na neutrony wkrótce po Wielkim Wybuchu. Bez protonów jednak nie byłoby jąder atomowych, a zatem również atomów i chemii.



II. 3. Życie wydaje się mieć problem z pojawieniem się, nie mówiąc już o podtrzymaniu swojego istnienia, we wszechświecie z tylko dwoma wymiarami przestrzennymi. Najzwyklejsze czynności polowania i jedzenia nie funkcjonują.

Innym tego przykładem jest wytwarzanie węgla w gwiazdach. Na tyle, na ile wiemy, węgiel jest niezbędny do życia. Ale wszechświat narodził się bez niego. Węgiel powstaje głównie podczas syntezy jądrowej zachodzącej we wnętrzu gwiazd. W latach pięćdziesiątych brytyjski kosmolog Fred Hoyle wskazał, że wydajna synteza węgla z helu w gwiazdach opiera się na delikatnej równowadze między oddziaływaniem silnym, które wiąże jądra atomowe, a siłą elektromagnetyczną. Gdyby oddziaływanie silne było tylko odrobinę mocniejsze lub słabsze — zaledwie o kilka procent — energie wiązania jąder atomowych uległyby zmianie, hamując syntezę węgla i tym

samym pozbawiając wszechświat życia opartego na węglu. Dla Hoyle'a było to tak dziwne, że jego zdaniem wszechświat wyglądał jak „ukartowana robota”, tak jakby „superintelekt bawił się w fizykę, chemię i biologię”².

Lecz najbardziej oszałamiające życiodajne precyzyjne dostrojenie dotyczy ciemnej energii. Wartość zmierzonej przez nas gęstości ciemnej energii jest niezwykle mała — mniejsza o oszałamiający czynnik 10^{-123} od tego, co wielu fizyków mogło uważać za jej naturalną wartość. A jednak to właśnie ta drobinka doprowadziła do tego, że wszechświat pozostał „niezdecydowany” przez blisko osiem miliardów lat, zanim ciemna energia była w stanie skumulować się na tyle, by przyspieszyć ekspansję. Już w 1987 roku Steven Weinberg zwrócił uwagę, że gdyby gęstość ciemnej energii była nieco większa, powiedzmy 10^{-121} razy mniejsza od swej naturalnej wartości, jej działanie odpychające byłoby silniejsze i rozpoczęłoby się wcześniej, po raz kolejny zamykając kosmiczny przedział możliwości powstawania galaktyk³.

Krótko mówiąc, jak podkreślił Stephen w naszej pierwszej rozmowie, wydaje się, że wszechświat został w jakiś sposób zaprojektowany, aby umożliwić pojawienie się życia. Znany pisarz i fizyk teoretyczny Paul Davies wypowiedział się w tym kontekście o czynniku Złotowłosej wszechświata: „Niczym owsianka z opowieści o Złotowłosej i trzech misiach, wszechświat wydaje się «w sam raz» dla życia na wiele intrygujących sposobów”⁴. I choć nie oznacza to wcale, że kosmos powinien tętnić życiem, racjonalnie uzasadnione dostrojenia, sprawiające, że w ogóle nadaje się do zamieszkania, w żaden sposób nie są powierzchownymi cechami świata. Zamiast tego są głęboko wpisane w matematyczną formę praw fizyki. Masy i właściwości wielu cząstek, siły rządzące ich oddziaływaniami, a nawet ogólny skład wszechświata — wszystko, co wydaje się dostosowane do wspierania jakiejś formy życia — odzwierciedlają specyficzny charakter zależności matematycznych, które definiują to, co fizycy nazywają prawami przyrody. Tak więc zagadka projektu w kosmologii polega na tym, że fundamentalne prawa fizyki wydają się szczegółowo zaprojektowane, aby umożliwić

pojawienie się życia. To tak, jakby działał ukryty plan, który splata nasze istnienie z podstawowymi zasadami rządzącymi wszechświatem. Wydaje się to niewiarygodne. I takie właśnie jest! Co to za plan?

Powinienem teraz podkreślić, że to bardzo niezwykła zagadka dla fizyków teoretycznych. Zazwyczaj fizycy używają praw przyrody do opisywania takiego czy innego zjawiska lub przewidywania wyniku eksperymentu. Próbuje również uogólnić istniejące prawa, aby objęły swoim zasięgiem szerszy zakres zjawisk przyrodniczych. Ale te pytania dotyczące projektu prowadzą nas na zupełnie inną ścieżkę, skłaniają do refleksji nad głębszą naturą praw i nad tym, jak my pasujemy do ich scenariusza. Współczesna kosmologia fascynuje tym, że zapewnia ramy naukowe, w obrębie których możemy się spodziewać wyjaśnienia tej największej ze wszystkich tajemnic. Wynika to stąd, że spośród wszystkich dziedzin fizyki jedynie w kosmologii stanowimy nieodłączną część problemu, który staramy się rozwiązać.

Historycznie rzecz ujmując, ten pozorny projekt świata był traktowany jako dowód, że istnieje ukryty cel działania natury. Pogląd ten głosił Arystoteles, być może najbardziej wpływowy filozof w historii ludzkości. Arystoteles, również zapalony biolog, zauważył, że wiele procesów działających w świecie ożywionym prawdopodobnie jest kierowanych celowością. A skoro żywe istoty pozbawione rozumu mają plan działania, musi istnieć ostateczna przyczyna rządząca kosmosem jako całością. Arystotelesowski argument teleologiczny był przekonujący, logiczny, pocieszający i do pewnego stopnia potwierdzony empirycznie; świat wokół nas emanuje niekończącymi się przykładami ostatecznych przyczyn w działaniu, od ptaka zbierającego gałązki do budowy gniazda po psa kopiącego dziurę w ogrodzie i szukającego kości. Nic więc dziwnego, że poglądy teleologiczne Arystotelesa utrzymywały się przez prawie dwa tysiąclecia.

Lecz wówczas, w XVI wieku, gdzieś na peryferiach kontynentu euroazjatyckiego, praca wąskiego kręgu uczonych zapoczątkowała nowożytną

rewolucję naukową. Kopernik, Kartezjusz, Bacon, Galileusz oraz im współcześni podkreślali, że nasze zmysły mogą nas zwodzić. Stosowali łacińską maksymę: *Ignoramus*, co dosłownie oznacza „nie wiemy”. Ta zmiana perspektywy spowodowała dalekosiężne konsekwencje. Niektórzy uważają nawet, że jest to jedna z najbardziej wpływowych przemian od około dwustu tysięcy lat, czyli od kiedy ludzie zamieszkują naszą planetę. Co więcej, jej pełne znaczenie wciąż czeka na odkrycie. Bezpośrednim rezultatem rewolucji naukowej, przynajmniej w kręgach naukowych, było odrzucenie głęboko zakorzonego teleologicznego poglądu Arystotelesa na świat i zastąpienie go ideą, że przyrodą rządzą racjonalne prawa działające tu i teraz, które możemy odkryć i zrozumieć. Sama istota współczesnej nauki polega na tym, że przyznając się do niewiedzy, możemy zdobywać nową wiedzę dzięki eksperymentom i obserwacjom oraz poprzez tworzenie modeli matematycznych, które porządkują te obserwacje w ramach ogólnych teorii lub „praw”.

Paradoksalnie jednak rewolucja naukowa pogłębiła zagadkę bioprzyjazności wszechświata. Przed rewolucją naukową można było dostrzec swego rodzaju jedność tworzącą podstawę pojmowania świata przez człowieka: uważano, że zarówno światami ożywionymi, jak i nieożywionymi kieruje wszechogarniający cel, boski lub inny. Projekt świata był postrzegany jako przejaw wielkiego kosmicznego planu, który oczywiście przypisywał uprzywilejowaną rolę człowiekowi. Na przykład starożytny model świata, przedstawiony przez aleksandryjskiego astronoma Ptolemeusza w dziele *Almagest*, był zarówno geocentryczny, jak i antropocentryczny.

Wraz z nadejściem rewolucji naukowej fundamentalny charakter związku życia z fizycznym wszechświatem stał się zagmatwany. Prawie pięć wieków naszego zakłopotania faktem, że rzekomo obiektywne, bezosobowe, ponadczasowe prawa fizyki są niemal idealnie dostosowane do istnienia życia, stanowi wyraźny przejaw tego zamętu. Tak więc, chociaż współczesna nauka z powodzeniem zniosła dawną dychotomię między niebem a ziemią, to

stworzyła potężną nową przepaść między światem żywym a nieożywionym, pozostawiając człowieka w dręczącej niepewności postrzegania swojego miejsca w wielkim kosmicznym planie.

Prawdę powiedziawszy, możemy bardziej docenić, w jaki sposób ewoluowały ludzkie poglądy na ontologię praw przyrody, wracając do głębszych korzeni koncepcji istnienia praw. Pierwsze ślady praw rządzących przyrodą pojawiły się w VI wieku p.n.e. w Milecie, w jońskiej szkole Talesa, w zachodniej części dzisiejszej Turcji. Milet, najbogatsze miasto jońskiej Grecji, został założony przy naturalnym porcie w pobliżu miejsca, w którym rzeka Meander wpada do Morza Egejskiego. Właśnie tam legendarny Tales, podobnie jak współcześni naukowcy, starał się zajrzeć pod zewnętrzne pozory świata, aby zdobyć wiedzę na głębszym poziomie.

Tales miał ucznia Anaksymandra, który stworzył coś, co Grecy zaczęli nazywać *περι φύσεως ιστορία*, „badaniami nad naturą”, czyli fizyką. Anaksymander jest również uważany za ojca kosmologii, gdyż pierwszy wyobraził sobie Ziemię jako planetę — gigantyczną skałę, swobodnie unoszącą się w pustej przestrzeni. Jego zdaniem pod Ziemią nie było jeszcze więcej Ziemi bez końca ani gigantycznych kolumn, ale to samo niebo, które widzimy nad naszymi głowami. W ten sposób Anaksymander nadał kosmosowi głębię, przekształcając go z zamkniętej skrzyni — z niebem u góry i ziemią na dole — w otwartą przestrzeń. Ta zmiana pojęciowa pozwoliła wyobrazić sobie ciała niebieskie przechodzące pod Ziemią, co uutorowało drogę greckiej astronomii. Anaksymander napisał także traktat *O naturze*, który zaginął, ale uważa się, że zawierał następujący fragment⁵:

Wszystkie rzeczy pochodzą od siebie nawzajem,
i znikają w sobie,
według potrzeby;
bo czynią sobie nawzajem sprawiedliwość
i wynagradzają za swoją niesprawiedliwość;

zgodnie z porządkiem czasu.

W tych kilku liniijkach Anaksymander wyraża rewolucyjną ideę, że natura nie jest arbitralna ani absurdalna, lecz rządzi się jakąś formą prawa. Oto podstawowe założenie nauki: pod powierzchnią zjawisk przyrody kryje się abstrakcyjny, ale spójny porządek.

Anaksymander nie zastanawiał się, jaką formę mogą przybrać prawa natury — przeprowadził jedynie prostą analogię do praw obywatelskich regulujących stosunki międzyludzkie w społeczeństwie. Natomiast jego najsłynniejszy uczeń, Pitagoras, zaproponował matematyczną podstawę porządku świata. Pitagorejczycy przypisywali liczbom mistyczne znaczenie i próbowali zbudować z nich cały kosmos. Ich pomysł, że świat można opisać za pomocą matematyki, przejął Platon, czyniąc zeń jeden z filarów swojej teorii prawdy. Platon porównał świat naszych doświadczeń do cieni znacznie wyższej rzeczywistości doskonałych form matematycznych, która istnieje zupełnie niezależnie od postrzeganej przez nas realności. Dlatego starożytni Grecy doszli do przekonania, że chociaż nie możemy od razu dotknąć ani zobaczyć leżącego u podstaw porządku świata, możemy go wywnioskować za pomocą logiki i rozumu.



II. 4. Relief przedstawiający starożytnego greckiego filozofa Anaksymandra z Miletu. Dwadzieścia sześć wieków temu Anaksymander z Miletu położył podwaliny pod długi i kręty proces naukowy przemyślenia świata na nowo.

Spekulacje starożytnych na temat przyrody, choć z pewnością imponujące, mają niewiele wspólnego ze współczesną fizyką zarówno pod względem zawartości, jak i metody lub stylu. Po pierwsze, wczesni Grecy rozumowali prawie wyłącznie na gruncie estetycznym i na podstawie wcześniejszych założeń, nie zadając sobie zbyt wielkiego trudu, aby je zweryfikować. Po prostu nie przyszło im to do głowy. W wyniku tego ich koncepcja „fizyki” i przypominającego prawa schematu rzeczy w niczym nie przypomina współczesnej teorii naukowej. W swej ostatniej książce *To Explain the World* [Wyjaśnić świat] nieżyjący już Steven Weinberg twierdził, że ze współczesnego punktu widzenia wczesnych Greków słuszniej jest traktować nie jako fizyków, naukowców czy nawet filozofów, ale jako poetów, ponieważ ich metodologia różni się zasadniczo od tego, co można zakwalifikować jako dzisiejszą działalność naukową. Oczywiście współcześni fizycy również dostrzegają piękno w swoich teoriach i większość z nich bierze pod uwagę

kwestie estetyczne w swych badaniach, ale takie rozważania nie stanowią alternatywy dla weryfikacji teorii za pomocą eksperymentu i obserwacji, które są przecież kluczowymi osiągnięciami rewolucji naukowej.

Niemniej , zapoczątkowana przez Platona wizja „zmatematyzowania” świata okazała się niezwykle wpływowa. Kiedy dwadzieścia wieków później rozpoczęła się współczesna rewolucja naukowa, jej główni uczestnicy byli na tyle motywowani wiarą w program platoński, aby chcieć szukać ukrytego porządku, na którym opiera się świat fizyczny, w kategoriach matematycznych relacji. „Wielką księgę natury — napisał Galileusz — mogą czytać tylko osoby znające język, w którym została napisana. A tym językiem jest matematyka”⁶.

Isaac Newton, alchemik, mistyk, trudny charakter, ale jeden z najwspanialszych matematyków w historii, utrwalił matematyczne podejście do filozofii przyrody swoimi *Principiami*, prawdopodobnie najważniejszym dziełem w historii nauki. Newton zaczął pracę nad nim w trakcie pobytu na przymusowej kwarantannie podczas zarazy w 1665 roku, kiedy zamknięto Uniwersytet w Cambridge. Newton, świeżo upieczony bakałarz, wrócił do domu matki i sadu jabłoniowego w Lincolnshire. Rozmyślał tam o rachunku różniczkowym, grawitacji i ruchu oraz rozszczepiał promienie słoneczne za pomocą pryzmatu, dowodząc tym, że białe światło składa się z barw tęczy. Ale dopiero znacznie później, bo w kwietniu 1686 roku, Newton przekazał Royal Society do publikacji swoje dzieło *Philosophiae naturalis principia mathematica*, gdzie zawarł trzy zasady dynamiki i prawo powszechnego ciężenia. To ostatnie jest chyba najbardziej znanym prawem przyrody, które mówi o tym, że siła ciężenia pomiędzy dwoma ciałami jest proporcjonalna do mas obu ciał i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu ich odległości.

Wykazanie przez Newtona w *Principiach*, że te same uniwersalne zasady leżą u podstaw działania boskich niebios i otaczającego nas niedoskonałego ludzkiego świata, oznaczało konceptualne i duchowe zerwanie z przeszłością. Czasami mówi się, że Newton zjednoczył niebo i ziemię. Jego synteza ruchów

planet zawarta w kilku matematycznych równaniach przekształciła wszystkie poprzednie obrazowe opisy Układu Słonecznego i sygnalizowała przejście od epoki magii do współczesnej fizyki. Program Newtona dostarczył ogólnego paradygmatu, za którym podążyła cała późniejsza fizyka. W przeciwieństwie do „fizyki” starożytnych Greków, której niemal nie rozumiemy, współcześni fizycy czują się doskonale z fizyką Newtona.

Jednym z najsłynniejszych sukcesów praw Newtona było odkrycie planety Neptun w 1846 roku. Wcześniej astronomowie zaobserwowali, że tor Urana nieznacznie odbiega od orbity przewidzianej przez prawo powszechnego ciążenia Newtona. Francuz Urbain Le Verrier, próbując wyjaśnić tę uporczywą rozbieżność, odważnie zasugerował, że jest ona spowodowana obecnością nieznaną planety w znacznie większej odległości, której przyciąganie grawitacyjne w niewielkim stopniu wpłynęło na trajektorię Urana. Korzystając z praw Newtona, Le Verrier był w stanie przewidzieć, gdzie na niebie powinna się znajdować ta nieznaną planeta, aby wyjaśnić zaburzenie orbity Urana — pod warunkiem, że prawa Newtona były poprawne. Rzeczywiście astronomowie wkrótce znaleźli Neptuna w odległości jednego stopnia od miejsca, które wskazał im Le Verrier. Okazało się to jednym z najbardziej niezwykłych momentów dziewiętnastowiecznej nauki. Mówiono, że Le Verrier odkrył nową planetę „czubkiem pióra”!⁷

Tego rodzaju oszałamiające sukcesy osiągnięte na przestrzeni wieków zdawały się umacniać prawa Newtona w roli uniwersalnej prawdy ostatecznej. Już w XVIII wieku francuski matematyk Joseph-Louis Lagrange zauważył, że Newton miał szczęście żyć w tym wyjątkowym czasie w historii ludzkości, w którym można było odkryć **p r a w d z i w e** prawa przyrody. Wydaje się, że sam Newton przyczynił się do rozpowszechnienia tego rodzącego się mitu. Prześiąknięty tradycją mistycyzmu traktował elegancką matematyczną formę swoich praw jako manifestację boskiego umysłu.

To właśnie matematyczne sformułowanie praw natury uosabia to, co dziś mają na myśli fizycy, używając słowa „teoria”. Teorie fizyczne czerpią swoją

użyteczność i zdolność predykcyjną z faktu, że opisują świat rzeczywisty za pomocą abstrakcyjnych równań matematycznych, którymi można manipulować, tak aby przewidzieć to, co wydarzy się w rzeczywistości, bez faktycznej obserwacji lub przeprowadzania eksperymentu. I to działa! Od odkrycia Neptuna przez detekcję fal grawitacyjnych do przewidywania nowych elementarnych cząstek i antycząstek, matematyczne podstawy praw fizyki wielokrotnie wskazywały na nowe i zaskakujące zjawiska naturalne, które zostały później zaobserwowane. Będąc głęboko pod wrażeniem tej potęgi przewidywania, laureat Nagrody Nobla Paul Dirac stał się słynnym piewcą odkrywania interesującej i pięknej matematyki jako uprzywilejowanego sposobu uprawiania fizyki. Matematyka „poprowadzi was za rękę — mówił — aby odkryć nowe teorie fizyczne”⁸. Dzisiejsi teoretycy strun w swoich poszukiwaniach ostatecznej zunifikowanej teorii w większości kierują się maksymą Diraca — niekiedy ulegając pokusie starożytnych, by potraktować matematyczne piękno stworzonych przez siebie ram jako gwarancję ich poprawności. Jak to wyraziło kilku pionierów teorii strun, jest ona zbyt piękną strukturą matematyczną, aby nie miała związku z przyrodą.

Jednak na głębszym poziomie nadal nie do końca rozumiemy, dlaczego fizyka teoretyczna działa tak niewyobraźalnie dobrze. Dlaczego natura dostosowuje się do układu subtelnych matematycznych relacji działających pod jej powierzchnią? Co te prawa naprawdę znaczą? I dlaczego przyjmują taką, a nie inną formę?

Większość fizyków nadal w tej kwestii podąża za Platonem. Mają oni tendencję do postrzegania praw fizyki jako odwiecznych prawd matematycznych, nie tylko istniejących w naszych umysłach, ale działających w abstrakcyjnej rzeczywistości, która wykracza poza świat fizyczny. Na przykład prawa grawitacji lub mechaniki kwantowej są zwykle uważane za przybliżenie ostatecznej teorii, która istnieje gdzieś w sferze tego, co jeszcze nieodkryte. Tak więc podczas gdy prawa fizyczne pojawiły się w nowożytnej epoce naukowej przede wszystkim jako narzędzia do opisywania wzorców

występujących w naturze, to odkąd Newton określił ich matematyczne korzenie, zaczęły żyć własnym życiem, uzyskując rodzaj realności, która zastępuje świat fizyczny. Dla francuskiego erudyty Henriego Poincarégo z początku XX wieku pojęcie bezwarunkowych praw platońskich było niezbędnym założeniem, by w ogóle uprawiać naukę.

Chociaż wizja Poincarégo jest interesująca i ważna, stanowi też zagadkę. Jak dokładnie takie — oderwane od społeczeństwa — prawa w swym królestwie platońskim łączą się, aby rządzić fizycznym wszechświatem, nie mówiąc już o takim, który jest cudownie przyjazny życiu? Co najważniejsze, odkrycie Wielkiego Wybuchu oznacza, że nie jest to „tylko” pytanie filozoficzne. W istocie, jeśli Wielki Wybuch jest prawdziwym początkiem czasu, to wydaje się, że lepiej, by Poincaré miał rację, skoro bowiem prawa fizyczne mają określać początek wszechświata, można by pomyśleć, że mają przynajmniej jakąś formę istnienia poza czasem. Co ciekawe, teoria Wielkiego Wybuchu wnosi do dziedziny fizyki i kosmologii to, co można było uważać za czysto metafizyczne rozważania. Teoria ta konfrontuje nas z niektórymi naszymi założeniami dotyczącymi ostatecznego znaczenia praw fizycznych.

W końcowym rozrachunku idea, że prawa fizyki w jakiś sposób wykraczają poza świat przyrody czyni tajemniczym pochodzenie ich niezwykle przystosowania do wyłonienia się życia. Fizycy popierający ten pogląd mogą tylko mieć nadzieję, że potężna zasada matematyczna leżąca u podstaw ostatecznej teorii pewnego dnia wyjaśni ich biofilny charakter. Odpowiedzią dzisiejszych platoników na zagadkę projektu jest to, że okaże się on zapewne kwestią matematycznej konieczności: wszechświat jest taki, jaki jest, ponieważ natura nie ma wyboru. Jeśli traktować to jako odpowiedź, przypomina ona ostateczną przyczynę Arystotelesa przebraną w szaty współczesnej fizyki teoretycznej. Co więcej, pomijając sam fakt, że ostateczna teoria tego rodzaju pozostaje odległym marzeniem, nawet gdyby kiedykolwiek znaleziono tak potężną zasadę matematyczną, nie wyjaśniałaby ona, dlaczego wszechświat jest tak wyjątkowo przyjazny życiu. Żadna platońska prawda nie

była w stanie całkowicie zasypać przepaści między światem nieożywionym a światem żywym, która pojawiła się wraz z początkiem nowożytnej nauki. Zamiast tego musielibyśmy dojść do wniosku, że życie i inteligencja są po prostu szczęśliwymi zbiegami okoliczności z gruntu bezosobowej, doskonałej rzeczywistości matematycznej i niewiele więcej było tu do rozumienia.

Te platońskie skłonności w kwestii projektu w fizyce i kosmologii, choć nie są w jaskrawy sposób błędne, różnią się radykalnie od tego, jak od czasów Darwina biolodzy postrzegali projekt w świecie istot żywych.

Procesy nakierowane na cel i pozornie intencjonalny projekt są wszechobecne w świecie biologicznym. Stanowiły one w istocie podstawę teleologicznych poglądów Arystotelesa na przyrodę. Żywe organizmy są niezwykle złożone. Nawet pojedyncza żywa komórka zawiera różnorodną gamę składników molekularnych, które doskonale ze sobą współdziałają, pozwalając jej wypełniać wiele stojących przed nią zadań. W większych organizmach ogromna liczba komórek działa razem w skoordynowany sposób, tworząc skomplikowane, celowe struktury, takie jak oko czy mózg. Przed Karolem Darwinem ludzie nie byli w stanie zrozumieć, w jaki sposób procesy fizyczne i chemiczne mogłyby w ogóle stworzyć tak oszałamiającą funkcjonalną złożoność, i odwoływali się w swoich wyjaśnieniach do Projektanta. Osiemnastowieczny duchowny angielski William Paley porównał cuda świata ożywionego do działania zegara. Uważał on, że podobnie jak w przypadku tego urządzenia, ślady projektu w świecie biologicznym są zbyt wyraźne, by je zignorować, zatem „projekt musi mieć projektanta”⁹. Jednak teoria ewolucji Darwina, która wstrząsnęła tym paradygmatem, zdecydowanie wyeliminowała tego rodzaju teleologiczne myślenie z biologii. Głęboki wniosek Darwina polegał na tym, że ewolucja biologiczna jest procesem naturalnym i że proste mechanizmy — losowa zmienność i dobór naturalny — mogą wyjaśnić pozorny projekt w żywych organizmach bez potrzeby odwoływania się do Projektanta.

Na wyspach Galapagos Darwin odkrył rozmaite rodzaje zięb, które różniły się wielkością i kształtem dzioba. Zięby ziemne miały mocne dzioby nadające się do rozłupywania orzechów i nasion, podczas gdy zięby nadrzewne miały ostre, spiczaste dzioby, które były dobrze przystosowane do wydobywania owadów. Te i inne fakty z podróży Darwina zasugerowały mu, że różne odmiany zięb były ze sobą spokrewnione i ewoluowały w czasie pod wpływem ich specyficznych nisz ekologicznych.

W 1837 roku, świeżo po podróży na Galapagos na statku HMS Beagle, Darwin wykonał prosty szkic w jednym ze swoich czerwonych notatników, przedstawiający nieregularnie rozgałęzione drzewo. Ten szkic drzewa genealogicznego uchwycił zakres jego głębokiej, rozkwitającej teorii mówiącej o tym, że wszystkie żywe istoty na Ziemi są spokrewnione i pochodzą od jednego wspólnego przodka — czyli pnia owego drzewa — poprzez stopniowy i narastający proces selekcji środowiskowej działającej na losowo mutujące replikatory (zob. fot. 4 na wklejce).

Główną ideą darwinizmu jest to, że natura nie patrzy w przyszłość — nie przewiduje tego, co może być potrzebne do przetrwania. Zamiast tego wszelkie trendy, takie jak zmieniające się kształty dzioba lub postępujący wzrost długości szyi żyrafy, wynikają z presji selekcji środowiskowej, która działa przez długi czas w celu wzmocnienia użytecznych cech.

„W tym poglądzie na życie jest wielkość — napisał Darwin ponad dwadzieścia lat później — z jego kilkoma mocami, które pierwotnie zostały tchnięte w kilka form lub w jedną; i że podczas gdy ta planeta poruszała się zgodnie z ustalonym prawem grawitacji, od tak prostego początku nieskończone formy najpiękniejsze i najwspanialsze pojawiały się i pojawiają w wyniku działania ewolucji”¹⁰.

Darwinizm odwrócił argument Paleya do góry nogami, pokazując, że zegarek nie wymaga istnienia szwajcarskiego zegarmistrza. Podał w pełni ewolucyjny opis świata ożywionego, w którym jego pozorny projekt — wraz z prawami, którym podlega — jest rozumiany jako wyłaniające się

właściwości procesów naturalnych, a nie wynik jakiegoś nadprzyrodzonego aktu stworzenia.

Choć prawa biologiczne są wspaniałe, często uważa się je za nieco mniej fundamentalne niż ich odpowiedniki w fizyce. Mimo że wzorce przypominające prawa mogą być trwałe, nikt nie uważa ich za ponadczasowe prawdy. Co więcej, determinizm i przewidywalność odgrywały w biologii znacznie mniej zasadniczą rolę. Prawa ruchu Newtona są deterministyczne: pozwalają fizykom przewidywać, gdzie obiekty znajdą się w dowolnym momencie w przyszłości na podstawie ich położenia i prędkości obecnie (lub w dowolnym momencie w przeszłości). W schemacie Darwina losowość mutacji w żywych organizmach oznacza, że niemal niczego nie można z góry ustalić — nawet praw, które pewnego dnia mogą się pojawić. Ten brak determinizmu nasycia biologię istotnym elementem retrospektywnym. Ewolucję biologiczną można zrozumieć, tylko patrząc na nią wstecz w czasie. Teoria Darwina nie określa w szczegółach dokładnej ścieżki ewolucyjnej, prowadzącej od najwcześniejszych form życia do dzisiejszej zróżnicowanej i złożonej biosfery. Nie przewiduje drzewa życia, to nie był — i nie mógłby być — jej cel. Natomiast geniusz Darwina polegał na nakreśleniu ogólnych zasad organizacyjnych, pozostawiając tworzenie szczegółowych zapisów historycznych filogenetyce i paleontologii. Oznacza to, że teoria ewolucji Darwina przyjmuje, iż znane nam życie jest wspólnym tworem regularności przypominających prawa oraz określonej historii. Jego użyteczność polega na tym, że umożliwia naukowcom zrekonstruowanie drzewa życia wstecz w czasie, począwszy od naszych obserwacji dzisiejszej biosfery i hipotezy o wspólnym pochodzeniu.

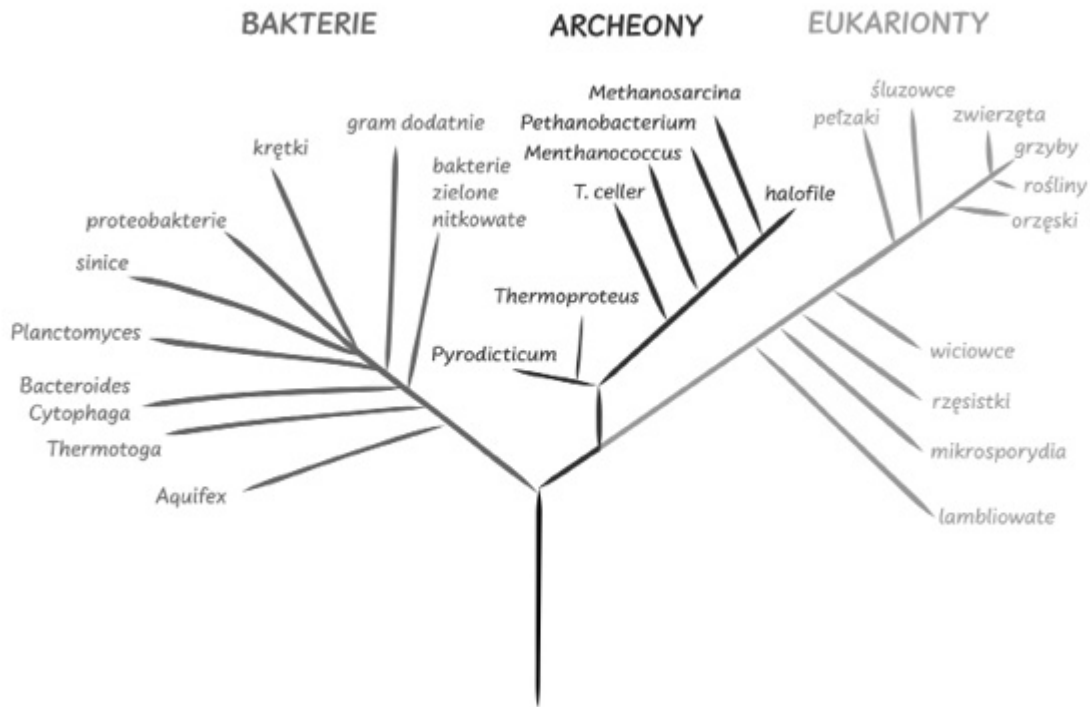
Zięby Darwina są tego przykładem. Gdyby Darwin rozumował do przodu w czasie i próbował przewidzieć różne gatunki zięb na wyspach Galapagos, zaczynając od środowiska chemicznego na prebiotycznej Ziemi, poniósłby całkowitą porażkę. Istnienia zięb ani jakiegokolwiek innego gatunku

zasiedlającego naszą planetę nie można wywnioskować wyłącznie na podstawie praw fizyki i chemii, ponieważ każde rozgałęzienie w ewolucji biologicznej wiąże się z grą losową. Niektóre przypadkowe wyniki są uprzywilejowane przez okoliczności środowiskowe i ulegają „zamrożeniu”, często z dramatycznymi konsekwencjami w dalszej kolejności. Takie zamrożone przypadki pomagają określić charakter późniejszej ewolucji i mogą nawet przybrać formę nowych praw biologicznych. Na przykład narodziny Mendlowskich praw dziedziczenia opierają się na wyniku zbiorowych rozgałęzień, które doprowadziły przede wszystkim do rozmnażania płciowego organizmów.

Na ilustracji 5 przedstawiam współczesną wersję filogenetycznego drzewa życia opartą na analizie sekwencji rybosomalnego RNA, ukazującą trzy królestwa — bakterie, archeony i eukarionty — oraz ich wspólnego przodka u podstawy drzewa. Wszystko na tym drzewie, od jego podstaw molekularnych po gałęzie gatunków zwierząt, zawiera złożoną i zawiłą historię miliardów lat chemicznych i biologicznych „eksperymentów”, czyniąc biologię nauką działającą głównie wstecz. Jak wyraził to biolog ewolucyjny Stephen Jay Gould: „Jeśli przewiniemy historię życia i ponownie puścimy taśmę, gatunek, plan ciała i fenotypy, które wyewoluują, mogą być zupełnie inne”¹¹.

Ta losowość nieodłącznie związana z ewolucją biologiczną rozciąga się na inne poziomy historii, od abiogenezy po historię ludzkości. Podobnie jak Darwin, historycy wyjaśniają przypadkowe zwroty akcji w historii, rozróżniając opisywanie „jak” i wyjaśnianie „dlaczego”. Aby opisać „jak”, historycy rozumują *post factum*, tak jak czynią to biolodzy, i rekonstruują ciąg konkretnych zdarzeń, które prowadziły od jednego punktu do określonego wyniku. Wyjaśnienie „dlaczego” wymaga myślenia jak fizyk i działania w przód w czasie w celu wyznaczenia przyczynowych, deterministycznych powiązań, które **p r z e w i d u j ą** jedną konkretną ścieżkę historyczną kosztem wszystkich innych. Powierzchowne odczytywanie historii często

zdaje się oferować przyczynowe deterministyczne wyjaśnienie, dlaczego sprawy potoczyły się w taki, a nie inny sposób. Ale bardziej wyrafinowana analiza ujawnia misterną sieć rywalizujących sił na rozdrożach, co wraz z dużą liczbą przypadków sprawia, że droga ta nie jest w żaden sposób oczywista ani nieunikniona, zmuszając do opisu „jak”, a nie „dlaczego”.



II. 5. Drzewo życia przedstawiające trzy odrębne domeny życia oraz, u podstawy drzewa, ich ostatniego uniwersalnego wspólnego przodka — zwanego LUCA — najwcześniejszą formę życia, z której wyewoluowało całe życie na Ziemi.

Pomyślmy o lesie, który widzę z okna mojego gabinetu, kilka kilometrów na południe od pola bitwy pod Waterloo. 17 czerwca 1815 roku, w przededniu głównego starcia, Napoleon Bonaparte nakazał swojemu generałowi Emmanuelowi de Grouchy’emu ścigać armię pruską, aby zapobiec jej połączeniu z siłami sprzymierzonymi i angielskimi zajmującymi pozycje dalej na północ. Grouchy posłusznie pomaszerował na północny wschód z dużą częścią wojsk francuskich, ale nie udało mu się spotkać Prusaków. Następnego ranka — z lasu, na który spoglądam — usłyszał w oddali głęboki dźwięk

francuskich armat i zdał sobie sprawę, że bitwa już się rozpoczęła. Przez kilka kluczowych minut wahał się, czy sprzeciwić się rozkazom Napoleona, zawracając i spiesząc na ratunek pozostałym żołnierzom francuskim. Ale zdecydował się iść dalej, z dala od przeznaczenia, w pogoni za Prusakami. Decyzja Grouchy'ego w tym momencie to niezwykle zamrożony przypadek, który wpłynął nie tylko na wynik bitwy, ale także na bieg historii Europy.

Albo weźmy inny przykład — rozwój chrześcijaństwa w Cesarstwie Rzymskim w IV wieku naszej ery. Kiedy cesarz Konstantyn wstąpił na tron w 306 roku, chrześcijaństwo było w zasadzie mało znaną sektą rywalizującą o wpływy z wieloma innymi kultami. Dlaczego chrześcijaństwo zdobyło największy wpływ w imperium rzymskim i stało się obowiązującą religią? Historyk Yuval Harari twierdzi w swojej książce *Sapiens*, że nie ma na to żadnego wyjaśnienia przyczynowego i że dominujący wpływ chrześcijaństwa w Europie Zachodniej należy postrzegać jako kolejny zamrożony przypadek. Naśladując to, co Gould uważał na temat biologii, Harari sądzi, że „gdybyśmy mogli cofnąć czas i odtworzyć IV wiek sto razy, przekonalibyśmy się, że chrześcijaństwo opanuje imperium rzymskie zaledwie kilka razy”. Ale zamrożony przypadek chrześcijaństwa miał daleko idące konsekwencje: monoteizm zachęcał do wiary w Boga Stwórcę dysponującego racjonalnym planem dla stworzonego świata. Nic więc dziwnego, że kiedy dwanaście wieków później w chrześcijańskiej Europie w końcu pojawiła się nowoczesna nauka, pierwsi naukowcy traktowali swoje badania raczej jako poszukiwania religijne, przygotowując grunt pod zagadkę projektu, z którą wciąż się zmagamy.

Ogólnie rzecz biorąc, niezliczone ścieżki rozpościerające się szeroko w każdym momencie dziejów, od historii ludzkości po ewolucję biologiczną i astrofizyczną, oznaczają, że wyjaśnienia deterministyczne są dostępne tylko na poziomie zgrubnym. Oznacza to, że na każdym etapie ewolucji determinizm i przyczynowość kształtują tylko najbardziej ogólne trendy i właściwości strukturalne, często na podstawie praw działających na niższym

poziomie złożoności. Na przykład historia ludzkości obfitująca w przypadkowe zwroty akcji rozgrywała się do tej pory zasadniczo w granicach planety Ziemia, z wyjątkiem kilku wycieczek na inne ciała niebieskie w Układzie Słonecznym. To planetarne uwięzienie nie powinno dziwić, a więc jest przewidywalne, biorąc pod uwagę fizyczne i geologiczne środowisko, w którym rozwijała się historia gatunku ludzkiego.

Podobnie rzecz się ma z tablicą Mendelejewa: szczegółowe uszeregowanie pierwiastków chemicznych i struktura układu okresowego pierwiastków są zasadniczo wyznaczone przez prawa fizyki cząstek elementarnych na niższym poziomie. Ale szczegółowa względna obfitość pierwiastków na Ziemi zależy od niezliczonych przypadków prowadzących do jej ewolucji i następujących w jej trakcie.

Przechodząc do poziomu biologicznego, zastanówmy się nad zasadą, że całe życie na Ziemi opiera się na DNA, a geny składają się z czterech nukleotydów oznaczonych literami A, C, G i T. Te konkretne elementy składowe cząsteczki DNA są prawdopodobnie przypadkowym wynikiem abiogenezy na naszej planecie. Ale podstawowa zdolność obliczeniowa, którą życie musi opanować, aby podtrzymać swe istnienie, sięga głębiej i może określać szerokie właściwości strukturalne tego molekularnego nośnika informacji genetycznej na podstawie fundamentalnych zasad matematycznych i fizycznych. Potwierdza to teoretyczna konstrukcja samoreprodukujących się automatów autorstwa węgiersko-amerykańskiego matematyka Johna von Neumanna, przedstawiona w 1948 roku. Pięć lat przed tym, jak Watson i Crick odkryli strukturę DNA, von Neumann określił krytyczne problemy obliczeniowe, które życie musi przezwyciężyć, aby zaistnieć, i zaproponował pomysłową strukturę — pozornie jedyną możliwą — która osiąga zdolność do replikacji. Naszkicowana przez niego struktura w oczywisty sposób przypomina DNA.

Ewolucja nieustannie opiera się na ogromnym łańcuchu przypadków. Niższe poziomy złożoności przygotowują środowisko dla wyższych

poziomów ewolucji, ale mamy jeszcze tyle miejsca na zaskakujące zwroty, że często realizowane są niezwykle nieprawdopodobne ścieżki, a determinizm zawodzi. Losowe wyniki podczas niezliczonych rozgałęzionych zdarzeń wprowadzają do ewolucji prawdziwie emergentny element. Dodają ogromną ilość informacji, które nie są zawarte w prawach niższego poziomu, z których mogą się wyłonić nowe wzorce przypominające prawa na wyższych poziomach — i często tak się właśnie dzieje. Na przykład, chociaż żaden poważny naukowiec nie wierzy dzisiaj, że w biologii istnieją szczególne „siły witalne”, które nie mają żadnego pochodzenia fizykochemicznego, sam poziom fizyczny nie określa, jakie będą prawa biologii na Ziemi.

Zaledwie osiemnaście dni po opublikowaniu 24 listopada 1859 roku swojego arcydzieła *O powstawaniu gatunków* Karol Darwin otrzymał list od astronoma sir Johna Fredericka Williama Herschela. Herschel, syn odkrywcy Urana, wyraził swą wątpliwość w kwestii arbitralności obrazu ewolucji Darwina, twierdząc, że jego książka jest „prawem miszmaszu”¹². Jednak w tym tkwi jego siła. Piękno teorii Darwina polega na tym, że proponuje syntezę konkurujących ze sobą sił losowej zmienności i selekcji środowiskowej działających w świecie ożywionym. Darwin znalazł złoty środek między „dlaczego” a „jak” w biologii, łącząc wyjaśnienia przyczynowe z rozumowaniem indukcyjnym w jeden spójny schemat. Wykazał, że biologia, mimo swojego fundamentalnie historycznego i przypadkowego charakteru, może być prawdziwie produktywną nauką, która poszerza nasze rozumienie świata ożywionego.

Darwinizm wzmocnił rewolucję naukową i rozszerzył ją na ten jeden obszar, w którym pogląd teleologiczny wydawał się niepodważalny — na świat istot żywych. Ale światopogląd, który z niego wypływa, pozostaje całkowicie odmienny od wyłaniającego się z fundamentalnej fizyki. Jest to szczególnie widoczne w radykalnie odmiennym pojmowaniu zagadki projektu. Podczas gdy darwinizm oferuje w pełni ewolucyjne zrozumienie

pojawienia się projektu w świecie ożywionym, fizyka i kosmologia poszukiwały w naturze ponadczasowych praw matematycznych mogących wyjaśnić, co przede wszystkim umożliwiło pojawienie się życia. Uчени zajmujący się naukami przyrodniczymi oraz fizycy często przeciwstawiali schematowi „mieszmaszu” darwinowskiej ewolucji sztywny i niezmienny charakter praw fizycznych. Uważa się, że na najniższym poziomie fizyki nie rządzą historia i ewolucja, lecz ponadczasowe piękno matematyczne. Wspaniała intuicja Lemaître’a prowadząca do wniosku, że wszechświat się rozszerza, w oczywisty sposób wprowadziła do kosmologii wyraźne rozumowanie ewolucyjne. Jednak na głębszym poziomie, gdzie rozważa się fundamentalne źródło pozornego projektu, podejścia Lemaître’a i Darwina wydają się prezentować głęboko różne światopoglądy (zob. fot. 3 i 4 na wklejce). Stanowi to przepaść pojęciową, która od czasu rewolucji naukowej oddziela biologię i fizykę.

Pokonanie tej przepaści zaprzętało myśli Stephena od samego początku jego kariery naukowej, ale przyjęło kształt realnego programu badawczego dopiero na przełomie XX i XXI wieku. Od tego czasu większość jego wysiłków badawczych koncentrowała się wokół zagadki kosmicznego projektu. Była to prawdziwa próba zmiany kosmologii od wewnątrz.

Wróćmy jednak do złotych lat dziewięćdziesiątych. Nieoczekiwaną obserwację, że wszechświat coraz szybciej się rozszerza, powiązano z równie zaskakującymi odkryciami teoretycznymi, które sugerowały, że prawa fizyki wcale nie muszą być wykute w kamieniu. Coraz więcej dowodów wskazywało na to, że przynajmniej niektóre właściwości praw fizycznych mogą nie być matematyczną koniecznością, lecz przypadkiem odzwierciedlającym określony sposób, w jaki ten wszechświat stygł po gorącym Wielkim Wybuchu. Stało się jasne, że przyjazna życiu sygnatura wszechświata — od rodzajów cząstek, przez siłę oddziaływań, po ilość ciemnej energii — mogła nie być wpisana w jego podstawową architekturę już na samym początku jako

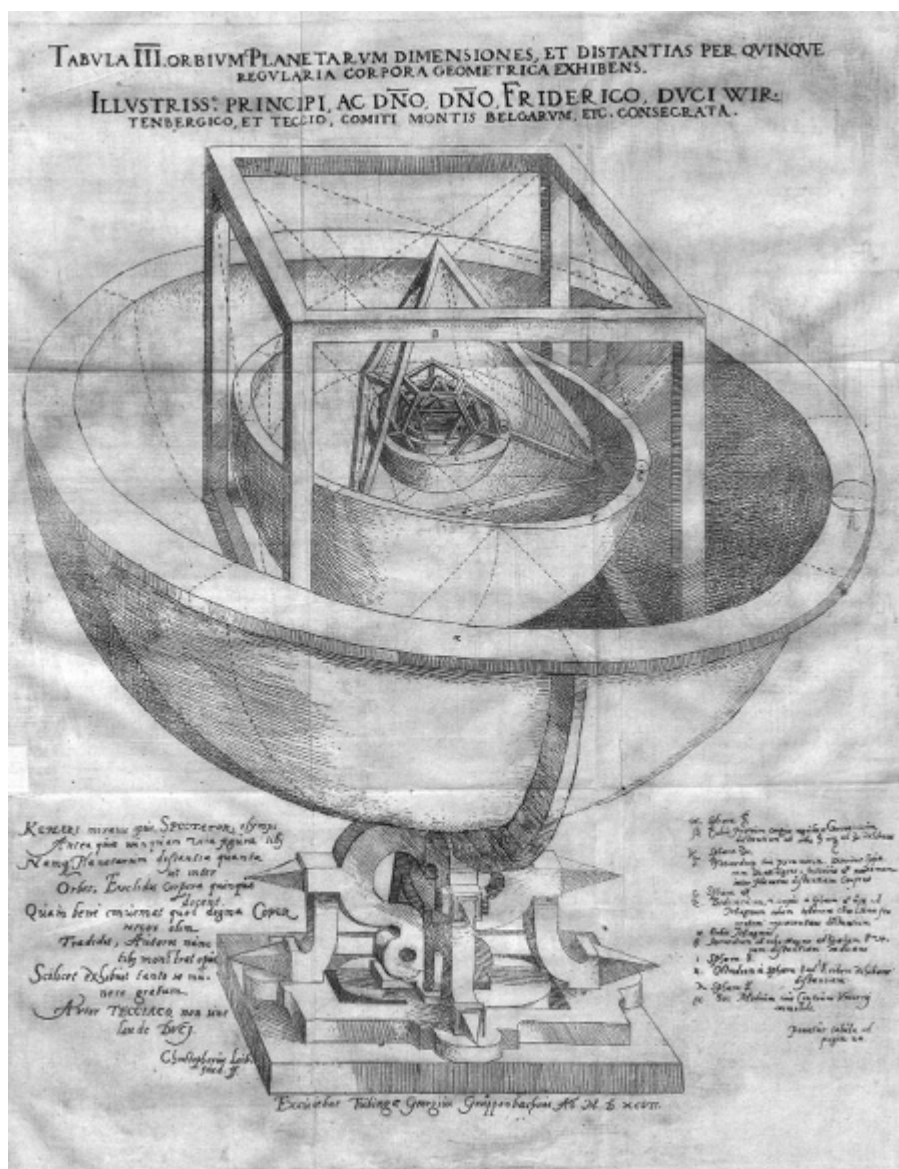
swego rodzaju świadectwo urodzenia, ale stanowi raczej wynik pradawnej ewolucji ukrytej w głębiach epoki Wielkiego Wybuchu.

Teoretycy strun niebawem zaczęli wyobrażać sobie zróżnicowany multiświat, olbrzymią rozdymającą się przestrzeń mogącą zawierać mozaikę wszechświatów wyspowych mających swoje własne prawa fizyki. To wielkie kosmiczne rozszerzenie doprowadziło do radykalnej zmiany perspektywy w kwestiach kosmicznego precyzyjnego dostrojenia. Zamiast opłakiwać koniec marzenia o jedynej teorii ostatecznej, która przewiduje, jaki powinien być świat, zwolennicy multiświata próbowali odwrócić tę kłopotliwą porażkę, przekształcając kosmologię w naukę o środowisku (bardzo dużym środowisku!). Jeden z teoretyków strun porównał lokalny charakter praw fizycznych w multiświecie do pogody na Wschodnim Wybrzeżu Stanów Zjednoczonych: „niesamowicie zmienna, prawie zawsze okropna, ale w rzadkich przypadkach urocza”¹³.

O znaczeniu tej zmiany możemy się dowiedzieć z historii nauki. W 1597 roku niemiecki astronom Jan Kepler opracował model Układu Słonecznego oparty na znanych od starożytności bryłach platońskich, pięciu regularnych wielościanach, z których najbardziej znany jest sześcian. Kepler postanowił wpasować niemal kołowe orbity sześciu znanych planet w niewidzialne sfery obracające się wokół Słońca. Następnie postawił hipotezę, że względne rozmiary tych sfer są podyktowane warunkiem, że każda sfera, oprócz zewnętrznej Saturna, pasuje tylko do wnętrza jednego z pięciu regularnych wielościanów i że każda sfera, z wyjątkiem najbardziej wewnętrznej Merkurego, pasuje tylko do zewnętrznej jednej z nich¹⁴. Rycina Keplera na ilustracji 6 ukazuje tę konfigurację, z wyraźnie widocznymi dwiema sferami, czworościanem i sześcianem. Kiedy Kepler umieścił pięć brył geometrycznych we właściwej kolejności jedna wewnątrz drugiej, wszystkie ściśle do siebie dopasowując, odkrył, że wstawione w nie sfery mogą być rozmieszczone w odstępach odpowiadających odległości każdej planety od Słońca, łącznie z Saturnem poruszającym się po sferze opisanej na najbardziej

zewnątrznym wielościannie, bez możliwości zmiany względnych promieni. Na tej podstawie przewidział całkowitą liczbę planet — sześć — jak również względne rozmiary ich orbit. Dla Keplera liczba planet i ich odległości od Słońca były przejawem głębokiej matematycznej symetrii w przyrodzie. Jego dzieło *Mysterium Cosmographicum* jest w istocie próbą pogodzenia starożytnego platońskiego marzenia o harmonii sfer z szesnastowiecznym przekonaniem, że planety krążą wokół Słońca.

W czasach Keplera uważano, że Układ Słoneczny to niemal cały wszechświat. Nikt nie przypuszczał, że gwiazdy są słońcami z własnymi układami planetarnymi. Zupełnie naturalnym założeniem było więc, że orbity planet są najbardziej fundamentalną sprawą. Dziś wiemy, że liczbie planet lub ich odległości od Słońca nie można przypisać większego znaczenia. Rozumiemy, że konfiguracja planet w Układzie Słonecznym nie jest ani niepowtarzalna, ani nawet wyjątkowa, ale stanowi przypadkowy wynik jego historii formowania się z wirującej mgławicy gazu i pyłu otaczającej protosłońce. W ciągu ostatnich trzech dekad astronomowie zaobserwowali tysiące układów planetarnych o bardzo odmiennej konfiguracji orbitalnej. Niektóre gwiazdy mają planety wielkości Jowisza okrążające je w ciągu kilku dni, inne mają trzy lub nawet więcej nadających się do zamieszkania planet podobnych do Ziemi, a jeszcze inne układy planetarne mają dwie gwiazdy, powodując chaotyczny układ dni i nocy oraz wiele innych ciekawych zjawisk.



II. 6. W swoim pierwszym wielkim dziele astronomicznym *Mysterium Cosmographicum* Jan Kepler przedstawił platoński model Układu Słonecznego wiążący rozmiary (kołowych) orbit planet z pięcioma wielościanami foremnymi.

Na rysunku Keplera wyraźnie widać cztery sfery planetarne oraz dwunastościan, czworościan i sześcian.

Jeśli rzeczywiście żyjemy w multiświecie, to prawa fizyki w naszym wszechświecie spotkałby ten sam los co orbity planetarne w Układzie Słonecznym. Próżno byłoby pójść w ślady Keplera i szukać głębszego wyjaśnienia precyzyjnych dostrojów, które prowadzą do powstania życia. W multiświecie biologicznie przyjazne właściwości lokalnych praw byłyby

jedynie przypadkowym wynikiem losowych procesów zachodzących w gorącym Wielkim Wybuchu, który dał początek naszemu wszechświatowi wyspowemu. Tak więc zwolennicy multiświata twierdzą, że dzisiejsi platonicy patrzą w złym kierunku. Utrzymują, że to wcale nie głęboka prawda matematyczna sprawia, iż wszechświat jest przyjazny życiu, ale po prostu idealna lokalna pogoda kosmiczna. Każde wrażenie wielkiego kosmicznego projektu jest iluzją.

Jednak w tym rozumowaniu kryje się problem, który będzie mieć ogromne znaczenie, gdy przejdę do omówienia sedna ostatecznej teorii Hawkinga: multiświat sam w sobie jest konstruktem platońskim. Kosmologia multiświata postuluje istnienie pewnych ponadczasowych metapraw rządzących całością. Ale te metaprawa nie wyznaczają, w którym z wielu wszechświatów my powinniśmy być. Jest to problem, ponieważ bez reguły, która wiąże metaprawa multiświata z lokalnymi prawami w naszym wszechświecie wyspowym, teoria ta wpada w spiralę paradoksów, która podważa jej podstawową spójność. Kosmologia multiświata jest zasadniczo nieokreślona i wieloznaczna: brakuje w niej istotnych **i n f o r m a c j i** o naszym miejscu w tym szalonym kosmicznym gobelinie i w rezultacie nie potrafi przewidzieć, co powinniśmy obserwować. Multiświat jest jak karta debetowa bez kodu PIN lub, co gorsza, jak szafa z IKEA bez instrukcji. W głębokim sensie ta teoria nie mówi nic o tym, kim jesteśmy w kosmosie i dlaczego się w nim znaleźliśmy.

Zwolennicy wieloświata zaproponowali sposób załatania tej teorii, będący propozycją tak radykalną, że od tamtej pory wstrząsnęła społecznością naukową. Jest to **z a s a d a a n t r o p i c z n a**.

Zasada antropiczna pojawiła się w kosmologii w 1973 roku. Astrofizyk Brandon Carter, który studiował w Cambridge razem ze Stephenem, zaproponował tę zasadę na konferencji w Krakowie upamiętniającej Kopernika. Był to osobliwy żart historii, gdyż w XVI wieku to właśnie

Kopernik poczynił pierwsze kroki w kierunku pozbawienia ludzkości jej wyjątkowego miejsca w kosmosie¹⁵. Ponad cztery wieki później Carter zgodził się z Kopernikiem, że my, ludzie, nie jesteśmy głównym elementem kosmicznego porządku. Jednak, rozumował, czy aby nie daliśmy się zwieść, gdy założyliśmy, że nie jesteśmy w żaden sposób wyjątkowi, zwłaszcza w świetle naszych własnych obserwacji kosmosu? Może widzimy wszechświat taki, jaki jest, ponieważ jesteśmy tutaj?

Carter miał rację. Z pewnością nie moglibyśmy obserwować niczego w miejscu lub czasie, w którym nie istnieliśmy. Już w latach trzydziestych XX wieku naukowcy tacy jak Lemaître i amerykański astronom Robert Dicke zastanawiali się, jakie właściwości musiałby mieć wszechświat, aby wspierać istnienie inteligentnych istot. Na przykład formy życia — inteligentne bądź inne — opierają się na węglu, który jest wytwarzany w trakcie reakcji termojądrowej w gwiazdach, w procesie, który trwa miliardy lat. Ale rozszerzający się wszechświat nie może zapewnić miliardów lat czasu, jeśli nie zawiera również miliardów lat świetlnych przestrzeni. Dlatego też nie powinno nas dziwić — stwierdzili Lemaître i Dicke — że żyjemy w starym i dużym wszechświecie. Rozszerzające się wszechświaty mają uprzywilejowany okres, w którym astronomowie mogą pracować, a to z konieczności wpływa na to, co widzą.

Takie wnioski nie różnią się zasadniczo od formułowanych przez nas, gdy bierzemy pod uwagę ograniczenia wyboru w codziennych sytuacjach. Jednak Carter poszedł dalej — znacznie dalej. Zasugerował, że skutki wyboru dokonanego przez obserwatora dotyczą nie tylko jednego wszechświata — naszego — ale całego multiświata. Podsunął pomysł, że działa tu zasada antropiczna, reguła wykraczająca poza bezosobowe metaprawa rządzące multiświatem, która uosabia optymalne warunki fizyczne wymagane dla życia i „działa” w celu wybrania jednego z wielu wszechświatów, który powinien być nasz.

To była rzeczywiście radykalna sugestia. Po raz kolejny stawiając życie

w uprzywilejowanej pozycji w centrum wyjaśnienia wszechświata, antropiczna zasada Cartera wydaje się cofać nas o pięć wieków, do czasów przedkopernikowskich. Postulując pewien preferowany stan rzeczy, który obejmuje życie, inteligencję, a nawet świadomość, na swój sposób flirtuje z teleologią — poglądem Arystotelesa, który rewolucja naukowa z powodzeniem obaliła, a przynajmniej tak nam się wydawało.

Nic więc dziwnego, że gdy w 1973 roku Carter po raz pierwszy przedstawił swoją kosmologiczną zasadę antropiczną, a teoretyczne dowody na jakikolwiek rodzaj multiświata były w najlepszym wypadku fragmentaryczne, jego rozważania powszechnie odrzucono jako nonsens. Ale na przełomie wieku w wyniku niezwyklego zbiegu okoliczności teoria multiświata zyskała na popularności, a antropiczne myślenie Cartera zostało wskrzeszone i wykorzystane, by uporządkować nasze miejsce w tej ogromnej kosmicznej mozaice. Zasada antropiczna zaczęła być traktowana jako kod PIN, który przekształcił teorię multiświata z abstrakcyjnego gmachu platońskiego we właściwą teorię fizyczną z prawdziwym potencjałem wyjaśniającym.

Miłośnicy multiświata oświadczyli, że znaleźli drugą możliwą odpowiedź na zagadkę projektu wszechświata — pierwsza głosi, że jest to jedynie zbieg okoliczności, szczęśliwa konsekwencja głębokiej, ale (tymczasowo) tajemniczej zasady matematycznej w samym sercu istnienia. Pochodząca z antropicznej kosmologii multiświata nowa odpowiedź sugerowała, że pozorny projekt jest właściwością naszego „lokalnego” kosmicznego środowiska: zamieszkujemy wyjątkowy, przyjazny życiu wszechświat w ogromnej kosmicznej mozaice wszechświatów wyspowych, wyróżniony przez zasadę antropiczną. To podejście spotkało się ze sporym entuzjazmem. „Jesteśmy jednością, wszechświat i my” — ogłosił Linde. „Nie potrafię wyobrazić sobie spójnej teorii wszechświata, która ignoruje życie i świadomość”¹⁶. W swojej książce *The Cosmic Landscape* [Kosmiczny krajobraz] dogmatyczny teoretyk strun Leonard Susskind z Uniwersytetu Stanforda (znanego ze śmiałych spekulacji) przedstawił tandem obiektywnych

metapraw rządzących multiświatem wspartych subiektywną zasadą antropiczną jako nowy **p a r a d y g m a t** fizyki fundamentalnej.

Tytan fizyki cząstek, Stephen Weinberg, również zasugerował, że rozumowanie antropiczne sygnalizuje początek nowej ery w kosmologii. Zaproponowany przez niego pod koniec lat sześćdziesiątych unifikujący pogląd, że elektromagnetyczne i słabe siły jądrowe są jednym i tym samym oddziaływaniem, stworzył podstawę modelu standardowego fizyki cząstek. Niektóre przewidywania tego modelu zostały od tego czasu zweryfikowane z oszałamiającą precyzją co najmniej do trzynastego miejsca po przecinku, co czyni go najdokładniej przetestowaną do tej pory teorią w fizyce. Jednak mimo całej tej precyzji Weinberg uważał, że zrozumienie głębszych powodów, dla których model standardowy przybiera swą szczególną formę, będzie od nas wymagać uzupełnienia matematycznych zasad tradycyjnej fizyki zasadą o zupełnie innym charakterze. „Większość postępów w historii nauki została naznaczona odkryciami dotyczącymi przyrody — powiedział w wykładzie *Życie w multiświecie* w Cambridge — ale w pewnych punktach zwrotnych dokonaliśmy odkryć dotyczących samej nauki i tego, co uważamy za akceptowalną teorię. Być może znajdujemy się w takim punkcie zwrotnym [...] że multiświat uzasadnia rozumowanie antropiczne jako nową podstawę teorii fizycznych”¹⁷. Światopogląd, na który tutaj powołuje się Weinberg, odzwierciedla pewną formę dualizmu. Istnieją prawa fizyczne lub metaprawa i odkrywamy je, ale są one martwe i bezosobowe. Oprócz tego istnieje jednak zasada antropiczna, która na swój tajemniczy sposób wiąże (meta)prawa z doświadczanym przez nas światem fizycznym.

Wyzwolilo to gwałtowną reakcję. Z biegiem lat zasada antropiczna stała się pod każdym względem najbardziej kontrowersyjną kwestią w fizyce teoretycznej. Niektórzy jednoznacznie formułują swój sprzeciw. „Teoria inflacyjna wykopała swój własny grób” — oświadczył współodkrywca inflacji kosmologicznej z Princeton, Paul Steinhardt. „Brzmi to jak rezygnacja” —

ujął wprost noblista David Gross z Uniwersytetu Kalifornijskiego. Inni uważają, że cała dyskusja o naszym miejscu w kosmosie jest przedwczesna. „Jest zbyt wcześnie, aby myśleć o takich sprawach”¹⁸ — powiedział skądinąd wizjonerski teoretyk Nima Arkani-Hamed do publiczności składającej się z fizyków zajmujących się teorią strun latem 2019 roku. Pięć wieków po nowożytnej rewolucji naukowej, która zasiała ziarna dualizmu w fizyce, jest to dość niezwykle stwierdzenie.

Ku frustracji Stephena milcząca większość teoretyków nadal odwracała wzrok, pochłonięta matematyką. Uważali oni — i nadal uważają — że badanie głębszego pochodzenia bioprzyjazności wszechświata wykracza poza zakres ich dyscypliny. Twierdzą raczej, że problem w jakiś cudowny sposób sam się rozwiąże, kiedy odkryjemy naczelne równanie teorii strun rządzące multiświatem. Pewnego razu przy herbacie w DAMTP Stephen, który nie unikał wsadzania kija w mrowisko, narzekał na ten stan rzeczy. „Jestem zdumiony — powiedział — że ludzie [teoretycy strun] mogą mieć takie klapki na oczach i nie zastanawiać się poważnie, jak i dlaczego wszechświat się tu pojawił”¹⁹. Stephen uważał, że do wyjaśnienia tajemnicy projektu nie wystarczy odkryć abstrakcyjne matematyczne metaprawa. Dla niego poszukiwanie zunifikowanej teorii w fizyce było nierozzerwalnie związane z początkiem podczas Wielkiego Wybuchu. Twierdził, że sen o teorii ostatecznej nie zostanie urzeczywistniony, jeśli potraktujemy go jako „tylko” kolejny problem laboratoryjny, ale należy go realizować w kontekście ewolucji kosmologicznej. W poszukiwaniach nowej wizji wszechświata matematyka była sługą, a nie panem Stephena. Tak więc Hawking zgadzał się z antropicznymi pryncypialistami, że lepsze zrozumienie przyjaznej życiu natury wszechświata było ważne i że sam platonizm może nie wystarczyć, lecz być może wymagać będzie zmiany paradygmatu, fundamentalnej modyfikacji sposobu, w jaki rozumiemy fizykę i badanie wszechświata²⁰. Z biegiem lat stawał się jednak coraz bardziej sceptyczny co do tego, że rozumowanie antropiczne jest rodzajem rewolucyjnej zmiany potrzebnej nam

w świetle rozwoju sytuacji. Jego główną obawą dotyczącą zasady antropicznej jako części nowego paradygmatu kosmologicznego nie była tak naprawdę jej jakościowa natura. Biologia i inne nauki historyczne obfitują w przewidywania o charakterze jeszcze bardziej jakościowym. Prawdziwy problem według niego polegał na tym, że rozumowanie antropiczne wykoleja podstawowy naukowy proces przewidywania i falsyfikacji.

Proces ten był szeroko omawiany przez austriacko-brytyjskiego filozofa nauki, Karla Poppera. Według niego fakt, że w wyniku racjonalnej argumentacji na podstawie dostępnych dowodów wciąż na nowo dochodzi do konsensusu wśród naukowców, czyni z nauki wyjątkowo potężne narzędzie do zdobywania wiedzy. Popper zdał sobie sprawę, że nigdy nie da się dowieść prawdziwości teorii naukowej, ale można ją sfalsyfikować, co oznacza, że można jej zaprzeczyć eksperymentami. Ale — i to jest kluczowy punkt rozumowania Poppera — ten proces falsyfikacji jest możliwy tylko dlatego, że teoretyczne hipotezy wymagają sformułowania jednoznacznych przewidywań w taki sposób, że gdyby znaleziono sprzeczne wyniki, co najmniej jedna przesłanka teorii nie pasowałaby do opisu przyrody. Ma to podstawowe znaczenie dla sposobu działania nauki, gdyż jest to sytuacja asymetryczna; potwierdzenie przewidywania teoretycznego wspiera teorię, ale jej nie dowodzi, podczas gdy falsyfikacja przewidywania może wykazać, że jest ona fałszywa. Możliwość fiaska pewnej hipotezy zawsze czai się tuż za rogiem w nauce i stanowi zasadniczą część jej postępu.

Jednak zasada antropiczna umieszcza ten proces na niepewnym gruncie, ponieważ osobiste kryteria tego, co stanowi wszechświat przyjazny życiu, wprowadzają do fizyki element subiektywny, który zagraża procesowi falsyfikacji Poppera. Wasza antropiczna perspektywa może wybrać pewien obszar w multiświecie z jednym zestawem praw, podczas gdy moje antropiczne skłonności mogą spowodować, że wybiorę drugi obszar z innym zestawem praw, i nie mamy obiektywnych kryteriów pozwalających zdecydować, które z tych podejść jest poprawne.

Jest to bardzo odmienne od ewolucji darwinowskiej, która w pomysłowy sposób unika czegoś na wzór analogii rozumowania antropocznego wkradającego się do biologii. To, czy życie pozaziemskie istnieje, nie mówiąc już o tym, jak ewoluowało, nie odgrywa w teorii Darwina żadnej roli. Darwinizm nie pozostawia też miejsca na wyróżnienie jednego konkretnego gatunku do odgrywania uprzywilejowanej roli w kwestiach biologicznych, czy to *Panthera leo*, czy *Homo sapiens*, czy jakiegokolwiek innego. Wręcz przeciwnie, darwinizm jest zakorzeniony w naszych relacjach z resztą żywego świata. Bierze pod uwagę wszystkie wzajemne powiązania w nim obecne. Jednym z monumentalnych spostrzeżeń Darwina było to, że *Homo sapiens* ewoluował razem z całością świata ożywionego. „Musimy przyznać, jak mi się wydaje, że człowiek ze wszystkimi swymi szlachetnymi cechami [...] nadal nosi w swym ciele niezatarte piętno swego niskiego pochodzenia” — pisał w swym dziele *O pochodzeniu człowieka*. Jak bardzo różni się to od antropocentricznej zasady Cartera w kosmologii działającej poza naturalną ewolucją wszechświata jako jej rozszerzenie!



II. 7a. W sierpniu 2001 roku Martin Rees, stojący tuż na lewo za Stephenem,

zwołał spotkanie w swojej wiejskiej posiadłości w Cambridge w Anglii, aby przedyskutować zalety zasady antropicznej w fizyce fundamentalnej i kosmologii — o ile w ogóle takie istnieją. Na marginesie tej konferencji Stephen i autor (trzeci rząd, za Stephenem) rozpoczęli poważną dyskusję, w jaki sposób kwantowe spojrzenie na kosmos może zastąpić antropiczne rozumowanie kosmologiczne. Konferencja Reesa zgromadziła wielu badaczy, którzy odegrali kluczową rolę w naszej podróży, w tym Neila Turoka (kuca pierwszy po lewej), Lee Smolina (siedzi po prawej) i Andreia Lindego, który stoi na końcu po prawej stronie w środkowym rzędzie. Na lewo od Lindego mamy Jima Hartle'a, ledwo widocznego za Bernardem Carrem, a następnie Jaume Garrigę, Alexa Vilenkina i Gary'ego Gibbonsa.

W popperowskim sensie, jeśli chodzi o falsyfikację, antropiczny multiświat niewiele różni się od kosmologii siedemnastowiecznego niemieckiego erudyty Gottfrieda Leibniza. W swojej *Monadologii* Leibniz zasugerował, że istnieje nieskończenie wiele wszechświatów, każdy z własną przestrzenią, czasem i materią, i że żyjemy w najlepszym z możliwych światów wybranym przez Boga w całej Jego dobroci.

Jest więc całkiem zrozumiałe, że społeczność naukowa znalazła się w stanie ustawicznego nieporozumienia w kwestii zalet zasady antropicznej. W swojej wnikliwej krytyce teorii strun zatytułowanej *Kłopoty z fizyką* amerykański fizyk i pisarz Lee Smolin wyraźnie zauważa, że „kiedy nefalsyfikowalna teoria jest traktowana priorytetowo względem falsyfikowalnych alternatyw, proces naukowy ulega zatrzymaniu i dalszy postęp w zdobywaniu wiedzy zostaje odrzucony”. To właśnie martwiło Stephena podczas naszej pierwszej rozmowy w jego gabinecie: gdy raz zaakceptuje się zasadę antropiczną, rezygnuje się z podstawowej przewidywalności, jaką daje nauka.

Znaleźliśmy się w impasie. Zasada antropiczna miała na celu określenie, „kim jesteśmy” w ogromnej kosmicznej mozaice, i tym samym funkcjonuje jako pomost łączący abstrakcyjną teorię multiświata z naszymi doświadczeniami jako obserwatorów w tym wszechświecie. Jednak nie czyni

tego w sposób, który zachowuje podstawowe zasady praktyki naukowej, pozostawiając kosmologię multiświata bez jakiegokolwiek mocy wyjaśniającej.

To prowadzi nas do niezwyklej obserwacji. W najszerszym sensie od czasu nowożytnej rewolucji naukowej poczyniliśmy zaskakująco niewielki postęp w kwestii zrozumienia pochodzenia pozornego projektu, który leży u podstaw fizycznej rzeczywistości. Owszem, dzisiaj potrafimy zanalizować historię rozszerzania się wszechświata w zaskakujących szczegółach, wiemy, jak grawitacja nadaje kształt wielkoskalowemu wszechświatowi, i znamy ściśle kwantowe zachowanie materii w skali znacznie mniejszej niż rozmiar protonu. Ale to szczegółowe fizyczne zrozumienie o ogromnym bez wątpienia znaczeniu służy jedynie uwypukleniu owej głębszej zagadki projektu. Przyjazny życiu charakter wszechświata nadal wywołuje spory, dzieląc społeczność naukową i szerokie kręgi społeczne. Głęboka przepaść pojęciowa nadal oddziela nasze rozumienie świata ożywionego od podstawowych warunków fizycznych, które umożliwiają powstanie życia. Dlaczego prawa matematyczne, które pojawiły się podczas Wielkiego Wybuchu, okazały się przyjazne życiu? Jak powinniśmy rozumieć to, że właśnie takie są? Ta rozbieżność między światem ożywionym i nieożywionym wydaje się głębsza niż kiedykolwiek wcześniej.

Fizycy twierdzą, że multiświat narzuca nam paradoks. Kosmologia multiświata opiera się na kosmicznej inflacji, idei, że wszechświat przeszedł epizod szybkiej ekspansji w swym najwcześniejszym stadium. Teoria inflacji od pewnego czasu może się poszczycić bogatym wsparciem obserwacyjnym, ale wykazuje kłopotliwą tendencję do tworzenia nie jednego, lecz bardzo wielu wszechświatów. A ponieważ nie mówi nam, w którym z nich powinniśmy się znaleźć — brakuje jej tych **i n f o r m a c j i** — teoria ta traci wiele ze swojej zdolności do przewidywania tego, co powinniśmy obserwować. Jest to paradoks. Nasza najlepsza teoria wczesnego

wszeczeństwa sugeruje, że żyjemy w multiświecie. Zarazem jednak multiświat niweczy wiele zdolności predykcyjnych tej teorii.

To nie pierwszy raz, gdy Stephen stanął w obliczu zdumiewającego paradoksu. W 1977 roku wskazał podobną zagadkę dotyczącą losu czarnych dziur. Ogólna teoria względności Einsteina przewiduje, że niemal wszystkie informacje o wszystkim, co wpadnie do czarnej dziury, pozostają na zawsze ukryte w jej wnętrzu. Ale Stephen odkrył, że teoria kwantowa powoduje paradoksalną zmianę tej sytuacji. Doszedł do wniosku, że procesy kwantowe w pobliżu powierzchni czarnej dziury powodują, że emituje ona niewielki, ale stały strumień cząstek, w tym kwantów światła. To promieniowanie — obecnie znane jako promieniowanie Hawkinga — jest zbyt słabe, aby można je było wykryć za pomocą instrumentów fizycznych, ale nawet samo jego istnienie jest z natury problematyczne²¹. Wynika to stąd, że jeśli czarne dziury wypromieniowują energię, muszą się kurczyć i ostatecznie zniknąć. Co się dzieje z ogromną ilością informacji ukrytych w jej wnętrzu, gdy czarna dziura pozbywa się ostatnich gramów swej masy? Obliczenia Stephena wskazywały, że informacje te zostaną utracone na zawsze. Twierdził, że czarne dziury to najlepsze kosze na śmieci. Scenariusz ten jest jednak sprzeczny z podstawową zasadą teorii kwantowej, która mówi, że procesy fizyczne mogą przekształcać i mieszać informacje, ale nigdy nie mogą nieodwracalnie ich unicestwić. Po raz kolejny docieramy do paradoksu: Procesy kwantowe powodują promieniowanie czarnych dziur i utratę informacji, ale teoria kwantowa mówi, że jest to niemożliwe.

Paradoksy związane z cyklem życia czarnych dziur i naszym miejscem w multiświecie stały się dwiema najbardziej nurtującymi i gorąco dyskutowanymi zagadkami fizyki ostatnich dziesięcioleci. Dotyczą one natury i losu informacji w fizyce, tym samym uderzając w samo sedno pytania o to, czego ostatecznie dotyczą teorie fizyczne. Oba paradoksy pojawiają się w kontekście tak zwanej półklasycznej grawitacji, teoretycznego opisu zapoczątkowanego przez Stephena i jego zespół z Cambridge w połowie lat

siedemdziesiątych XX wieku, opartego na połączeniu myślenia klasycznego i kwantowego. Te paradoksy pojawiają się, gdy stosuje się takie półklasyczne myślenie albo w wyjątkowo długich skalach czasowych (w przypadku czarnych dziur), albo w skrajnie dużych odległościach (w przypadku multiświata). Razem ucieleśniają głębokie trudności pojawiające się, gdy próbujemy harmonijnie połączyć ze sobą dwa filary dwudziestowiecznej fizyki — teorię względności i teorię kwantową. W tej roli służyły one jako skomplikowane „eksperymenty myślowe”, w ramach których teoretycy ekstrapolowali swoje półklasyczne myślenie o grawitacji do ostateczności, aby zobaczyć, gdzie i jak dokładnie się ono załamie.

Eksperymenty myślowe zawsze były ulubionym narzędziem Stephena. Odrzuciwszy filozofię, z przyjemnością eksperymentował z niektórymi głębokimi filozoficznymi pytaniami — czy czas miał swój początek, czy przyczynowość była fundamentalna, i najbardziej ambitnym, czyli jak my jako „obserwatorzy” wpisujemy się w ten kosmiczny plan. I czynił to, ubierając je w ramy sprytnych eksperymentów w fizyce teoretycznej. Wszystkie trzy przełomowe odkrycia Stephena w fizyce były wynikiem pomysłowych, starannie opracowanych eksperymentów myślowych. Pierwszym z nich był jego cykl twierdzeń o osobliwościach Wielkiego Wybuchu w klasycznej teorii grawitacji; drugim odkrycie z 1974 roku w półklasycznej grawitacji, że czarne dziury promieniują; trzecim jego postulat braku brzegów, również w półklasycznej teorii grawitacji, dotyczący powstania wszechświata.

Otóż, choć można twierdzić, że paradoks czarnej dziury ma jedynie znaczenie akademickie — mało prawdopodobne jest, aby drobne szczegóły promieniowania Hawkinga można było kiedykolwiek zmierzyć — paradoks multiświata ma bezpośredni wpływ na nasze kosmologiczne obserwacje. W samym sercu tego paradoksu leży bezpośrednia relacja we współczesnej teorii fizycznej między światem ożywionym i **o b s e r w a c j ą** a fizycznym wszechświatem. Paradoks multiświata stał się drogowskazem w dążeniu Hawkinga do wyobrażenia sobie na nowo tej relacji poprzez

opracowanie w pełni kwantowej perspektywy na kosmos. Jego ostateczna, w pełni kwantowa teoria wszechświata na nowo zarysowuje podstawowe fundamenty kosmologii i jest czwartym wielkim wkładem Hawkinga do fizyki. Wielki eksperyment myślowy leżący u podstaw tej teorii trwa w pewnym sensie już pięć stuleci. Jego przeprowadzenie stanowić będzie naszą podróż.



II. 7b. Stephen (po lewej) i autor (po prawej) w 2001 roku, wkrótce po wyruszeniu w podróż, w brukselskim barze À La Mort Subite.

¹ Lemaître często zapisywał naukowe spostrzeżenia z jednej strony swoich zeszytów, a duchowe refleksje z drugiej, pozostawiając kilka pustych kartek pośrodku, jakby chciał uniknąć niepotrzebnego mieszania nauki i religii.

² Fred Hoyle, *The Universe: past and present reflections*, „Annual Review of Astronomy and Astrophysics”, 20 (1982), s. 1–36.

³ Steven Weinberg, *Anthropic Bound on the Cosmological Constant*, „Physical Review Letters” 59 (1987), s. 2607.

⁴ Paul Davies, *The Goldilocks Enigma: Why Is the Universe Just Right for Life?* (London: Allen Lane, 2006), s. 3.

- 5 Ten ustęp dotarł do nas za sprawą Symplicjusza z Cylicji, który cytuje go w swoim komentarzu do *Fizyki* Arystotelesa.
- 6 Galileusz w *Il Saggiatore* (Rzym: Appresso Giacomo Mascardi, 1623).
- 7 Określenie przypisywane François Arago.
- 8 Paul Dirac, cyt. za: Graham Farmelo, *The Strangest Man: The Hidden Life of Paul Dirac, Mystic of the Atom* (New York: Basic Books, 2009), s. 435.
- 9 William Paley, *Natural Theology; or, Evidences of the Existence and Attributes of the Deity, Collected from the Appearances of Nature* (London: Printed for R. Faulder, 1802).
- 10 Charles Darwin, *On the Origin of Species*, manuskrypt, 1859.
- 11 Stephen Jay Gould, *Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History* (New York: Norton, 1989).
- 12 Charles Darwin, cyt. w: Charles Henshaw Ward, Charles Darwin, *The Man and his Warfare* (Indianapolis: Bobbs-Merrill, 1927), s. 297.
- 13 Leonard Susskind, *The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design* (New York: Little, Brown, 2006).
- 14 W szczególności, licząc w kolejności od Słońca, Kepler umieścił sferę Merkurego — ośmiościan, sferę Wenus — dwunastościan, sferę Marsa — czworościan, sferę Jowisza — sześćścian i na końcu sferę Saturna.
- 15 Pomimo tego, co sugeruje nazwa, ani Carter, ani nikt inny nie uważa, że zasada antropiczna dotyczy konkretnie ludzkości, ale bardziej ogólnych warunków pozwalających na istnienie życia. Szczegółowe omówienie tego pomysłu zob. John Barrow, Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (Oxford: Oxford University Press, 1986).
- 16 Andrei Linde w wykładzie *Universe, Life, Consciousness* (wykład, Grupa Fizyki i Kosmologii programu „Science and Spiritual Quest” Centrum Teologii i Nauk Przyrodniczych [CTNS], Berkeley, Kalifornia, 1998).
- 17 Steven Weinberg w wykładzie *Living in the Multiverse*, wygłoszonym na sympozjum „Expectations of a Final Theory” w Trinity College w Cambridge, wrzesień 2005, opublikowanym w *Universe or Multiverse?*, red. B. Carr (Cambridge: Cambridge University Press, 2007).
- 18 Nima Arkani-Hamed, *Prospects for Contact of String Theory with Experiments* (wykład, Strings 2019, Flagey, Bruksela 9–13 lipca 2019).
- 19 Hawking powtórzył to w swoim wykładzie *Cosmology from the Top Down* (Davis Meeting on Cosmic Inflation, Uniwersytet Kalifornijski, Davis, 22–25 marca 2003).
- 20 W książce *Struktura rewolucji naukowych* amerykański filozof nauki Thomas Kuhn wyjaśnił, że zmiany paradygmatu pojawiają się, gdy panujący paradygmat, w ramach którego działa uznana nauka, przestaje przystawać do nowych zjawisk. Można się zastanawiać, czym dokładnie były „nowe zjawiska”, które pojawiły się i spowodowały zmiany w kosmologii. Sądzę, że wśród nich były przede wszystkim obserwacje

astronomiczne przyspieszonej ekspansji pod koniec lat dziewięćdziesiątych. Składały się one w jedną całość z nowymi teoretycznymi wnioskami płynącymi z teorii strun, aby zilustrować przypadkową naturę praw biofilnych.

²¹ Hawking, współpracując ze swoim studentem Bernardem Carrem w połowie lat siedemdziesiątych, rozpatrywał istnienie małych czarnych dziur, które mogły powstać we wczesnym wszechświecie. Takie pierwotne czarne dziury byłyby gorętsze i szybciej by promieniowały. W istocie te o masie 10^{15} gramów — to znaczy o masie góry, ale wielkości protonu — powinny wybuchnąć w obecnej epoce wszechświata. Ku wielkiemu rozczarowaniu Stephena nie zaobserwowano żadnych takich eksplozji.

ROZDZIAŁ 2

Dzień bez wczoraj

L'espace-temps nous apparaît semblable à une coupe conique. On progresse vers le futur en suivant les génératrices du cône vers le bord extérieur du verre. On fait le tour de l'espace en parcourant un cercle normalement aux génératrices. Lorsqu'on remonte par la pensée le cours du temps, on s'approche du fond de la coupe, on s'approche de cette instant unique, qui n'avait pas d'hier parce qu'hier, il n'y avait pas d'espace.

Możemy porównać czasoprzestrzeń do otwartej, stożkowej misy. Poruszamy się w czasie, podążając w stożku ku górze. Poruszamy się w przestrzeni, podążając dookoła po okręgach. Jeśli wyobrazimy sobie cofanie się w czasie, docieramy do dna misy. To jest pierwsza chwila, owo teraz, które nie ma wczoraj, ponieważ wczoraj nie było przestrzeni.

GEORGES LEMAÎTRE, *L'HYPOTHÈSE DE L'ATOME PRIMITIF*

W wywiadzie¹ wyemitowanym w belgijskim radiu w kwietniu 1957 roku z okazji upamiętnienia drugiej rocznicy śmierci Alberta Einsteina Georges Lemaître przypomniał reakcję Einsteina, kiedy po raz pierwszy powiedział mu o swoim odkryciu, że wszechświat się rozszerza. Było to w październiku 1927 roku w Brukseli, gdzie zebrało się wielu najwybitniejszych fizyków na Piątym Kongresie Solvaya poświęconym fizyce. Trzydziestotrzyletni ksiądz astronom nie znalazł się wśród uczestników konferencji, ale spotkał się z Einsteinem w kularach tego spotkania. Jednak kiedy przekazał mu, że jego ogólna teoria względności przewiduje rozszerzanie się przestrzeni i dlatego powinniśmy widzieć galaktyki oddalające się od nas, Einstein zaproponował. „Po kilku przychylnych uwagach formalnych, [Einstein] zakończył stwierdzeniem, że z fizycznego punktu

widzenia wydaje mu się to «odrażające» — wspominał Lemaître w wywiadzie.

Niezrażony Lemaître potraktował swoje odkrycia poważnie i uznał, że ekspansja oznaczała, iż wszechświat musiał mieć początek w czymś, co nazwał **p i e r w o t n y m a t o m e m**, w maleńkim punkciku o oszałamiającej gęstości, którego stopniowy rozpad stworzyłby materię, przestrzeń i czas.

Dlaczego Einstein stanowczo sprzeciwił się pomysłowi, że wszechświat miał początek? Ponieważ uważał, że może to zniszczyć same podstawy fizyki. Sądził, że pierwotny atom Lemaître'a czy jakkolwiek inny rodzaj początkowego Wielkiego Wybuchu stanowiłby dla Boga sposobność do ingerencji w działanie natury. Podczas długich spacerów, które odbywali na początku lat trzydziestych, Einstein naciskał na Lemaître'a, aby ten znalazł sposób na uniknięcie początku, ponieważ „za bardzo przypomina to chrześcijański dogmat o stworzeniu”. Miał poczucie, że gdyby teoria kosmologiczna nadała wszechświatowi metrykę urodzenia, na zawsze byłaby zmuszona milczeć na temat tego, kto lub co stoi za jej wydaniem, pozbawiając nas wszelkiej nadziei na zrozumienie wszechświata na jego najbardziej podstawowym poziomie w sposób naukowy.

Belgijski duchowny na próżno próbował ułagodzić Einsteina, stwierdzając, że „hipoteza pierwotnego atomu jest antytezą nadprzyrodzonego stworzenia świata”². W gruncie rzeczy Lemaître traktował powstanie wszechświata jako wspaniałą okazję do poszerzenia zasięgu nauk przyrodniczych. Dyskusja z Einsteinem na temat ostatecznej przyczyny ekspansji wszechświata dotknęła sedna tajemnicy jego pozornego projektu. Ich debata była pod wieloma względami prekursorem sporu Lindego z Hawkingiem siedemdziesiąt lat później. Co miał na myśli Lemaître, kiedy wyobrażał sobie Wielki Wybuch jako „antytezę nadprzyrodzonego stworzenia”? Aby to zrozumieć, musimy przyjrzeć się bliżej pomysłom obu naukowców.

Teoretyczne podstawy współczesnej kosmologii opierają się na teorii względności Einsteina. To przenosi nas do przełomu XIX i XX wieku, do czasów, kiedy fizycy mieli do dyspozycji prawo powszechnego ciążenia i zasady dynamiki Newtona, a także teorię elektryczności, magnetyzmu i światła Jamesa Maxwella, które wraz z teorią ciepła stanowiły podstawę pierwszej rewolucji przemysłowej. Światopogląd wyłaniający się z tych dziewiętnastowiecznych teorii fizycznych był zgodny z naszym intuicyjnym obrazem rzeczywistości obejmującym cząstki i pola rozchodzące się w sztywnej przestrzeni i opisywane uniwersalnym zegarem — kosmicznym Big Benem, można by rzec. Nie powinno więc zaskakiwać, że fizycy uważali, iż zbliżają się do ostatecznego opisu natury i że fizyka wkrótce będzie kompletna.

Jednak w roku 1900 irlandzko-szkocki fizyk William Thomson, jeden z gigantów klasycznej dziewiętnastowiecznej fizyki, szerzej znany jako lord Kelvin³, dostrzegł „dwie ciemne chmury na horyzoncie”. Jedna z chmur dostrzeżona przez Kelvina miała związek z ruchem materii i światła w eterze, a druga z ilością promieniowania emitowanego przez gorące przedmioty. Mimo to większość fizyków uważała, że są to tylko szczegóły wymagające dopracowania i że gmach teorii fizycznej jest solidny i trwały.

Jednak w ciągu dekady ten gmach się zawalił. Próba znalezienia rozwiązania „szczegółów” wspomnianych przez Kelvina zapoczątkowała dwie wielkie rewolucje: teorię względności i teorię kwantową. Co więcej, każda z tych rewolucji skierowała fizykę w radykalnie odmiennym kierunku, rzucając nowy cień, który nadal przykrywa granicę dzisiejszej fizyki: problem dotyczący tego, jak pasują do siebie światy makro- i mikroskali.

Co właściwie było takiego w świetle, co zatrzęsało fundamentami dziewiętnastowiecznej fizyki? Prędkość. Precyzyjne eksperymenty wykazały, że światło zawsze porusza się z prędkością 299 792 kilometrów na sekundę, niezależnie od ruchu obserwatora względem źródła światła. W oczywisty sposób fakt ten nie pasował do codziennego doświadczenia: jeśli podróżujecie

w pociągu i zmierzycie jego prędkość, wyraźnie uzyskacie inną wartość (zerową) w porównaniu z tą, którą otrzymacie, stojąc na zewnątrz. Pozostawało to w sprzeczności także z głęboko zakorzenionym dziewiętnastowiecznym myśleniem. Uważano, że fale świetlne są przenoszone przez eter, tajemnicze medium wypełniające przestrzeń. Gdyby tak było, obserwatorzy poruszający się z różną prędkością względem eteru powinni widzieć fale świetlne podróżujące z różną prędkością. Jednak eksperymenty wykazały inaczej i był to wystarczający powód, aby Albert Einstein, urzędnik pracujący w szwajcarskim urzędzie patentowym, podał w wątpliwość istnienie eteru.

Einstein zrozumiał, że jeśli obserwujemy światło rozchodzące się zawsze z tą samą prędkością, to obserwatorzy poruszający się względem siebie muszą różnie postrzegać odległość i czas. W końcu prędkość jest miarą przebytej drogi podzielonej przez czas trwania podróży. Według Einsteina zamiast kosmicznego Big Bena każdy z nas posiada własny zegar i chociaż wszystkie one mogą być równie dokładne, to kiedy poruszamy się względem siebie, będą tykać w nieco różnym tempie i mierzą różne wartości czasu między tymi samymi dwoma zdarzeniami. To samo dotyczy odległości: długość pręta mierniczego jednego obserwatora może się nieco różnić od długości pręta innego obserwatora. Po prostu nie ma jednej uniwersalnej miary czasu trwania i odległości. To było sedno szczególnej teorii względności Einsteina z 1905 roku. Termin „względność” odnosi się tutaj właśnie do tej rewolucyjnej idei, że pojęcia przestrzeni, czasu i jednoczesności nie są faktami obiektywnymi, lecz zawsze wiążą się z perspektywą danego obserwatora.

Można się zastanawiać, co się dzieje z owymi różnicami odległości mierzonych przez jednego obserwatora względem drugiego. Czy po prostu znikają? Nie całkiem. Przekształcają się w czas. Zwróćcie uwagę, że ruch w przestrzeni łączy się z ruchem w czasie w relatywistycznym wszechświecie Einsteina. Kiedy patrzę na zaparkowany samochód sportowy mojej siostry, widzę, że cały jego ruch odbywa się w czasie. Ale jeśli odjedzie z piskiem

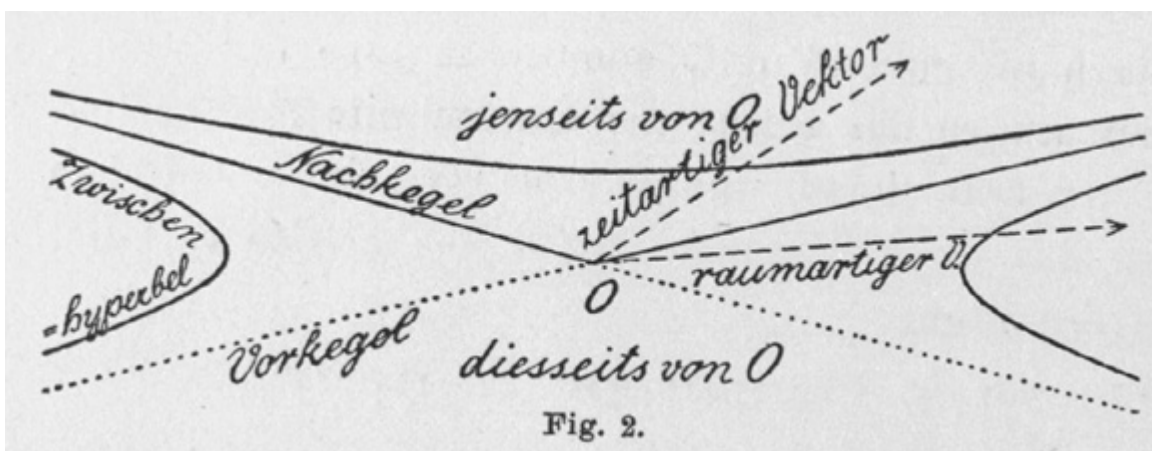
opon, niewielka część ruchu auta w czasie zostaje zamieniona na ruch w przestrzeni. Zegar samochodu mojej siostry będzie chodził odrobinę wolniej niż mój. I chociaż nie czyni jej to od razu „młodą damą o imieniu Bright”⁴, prowadzi do niewielkiej czasowej różnicy — jej zegar będzie się nieco później w porównaniu do mojego po jej powrocie. Maksymalną prędkość osiąga się, gdy ruch w czasie zostanie całkowicie zamieniony na ruch w przestrzeni. To właśnie jest prędkość światła — kosmiczny limit prędkości dla wszystkich sygnałów. Ogólnie rzecz biorąc, poruszanie się z prędkością światła w przestrzeni nie pozostawia miejsca na podróżowanie w czasie. Gdyby cząstka światła miała zegarek, w ogóle by nie tykał.

Dzięki tym wnioskom teoria Einsteina zerwała z głęboko zakorzenionym newtonowskim sposobem patrzenia na świat, w którym przestrzeń była nieruchomą areną, gdzie rozgrywały się wszystkie wydarzenia, a czas przypominał prostą strzałę, która podąża jednostajnie i zawsze od nieskończonej przeszłości do nieskończonej przyszłości. W koncepcji Newtona nic nie mogło w żaden sposób wpłynąć na sztywną naturę przestrzeni i liniowy upływ czasu. Poza tym czas i przestrzeń nie były ze sobą powiązane. Według Newtona czas istniał zawsze i zawsze będzie istnieć, niezależnie od jakiegokolwiek przestrzeni, która mogłaby istnieć lub nie.

Szczególna teoria względności Einsteina podważyła to wszystko, tworząc nierozzerwalny związek między przestrzenią a czasem. W 1908 roku niemiecki matematyk Hermann Minkowski, który był jednym z wykładowców Einsteina na politechnice w Zurychu, dokończył nowe Einsteinowskie sformułowanie przestrzeni i czasu i oznajmił: „Odtąd przestrzeń sama w sobie i czas sam w sobie są skazane na usunięcie w cień, a w niezależnej rzeczywistości przetrwają tylko jako partnerzy w swego rodzaju unii”⁵. Minkowski połączył trzy wymiary przestrzeni i jeden kierunek czasu w pojedynczy czterowymiarowy byt: **c z a s o p r z e s t r z e ń**.

Aby zobrazować ten czterowymiarowy związek, zwykle usuwamy jeden lub dwa z trzech wymiarów przestrzennych i rysujemy pozostałe wraz

z wymiarem czasowym na diagramie czasoprzestrzennym. Ilustracja 8 pokazuje pierwszy wykres czasoprzestrzeni Minkowskiego, na którym przedstawił tylko jeden wymiar przestrzeni biegnący poziomo i czas płynący w kierunku pionowym. Ta struktura pokazuje, w jaki sposób szczególna teoria względności na nowo definiuje nasz związek z wszechświatem. Jeśli usiadziemy w punkcie O , oznaczającym obserwatora, to sygnały poruszające się z prędkością światła docierające do nas z przeciwnych kierunków w przeszłości i sygnały wysłane z O ku przyszłości wytyczą dwie linie, które przecinają się w O i dzielą czasoprzestrzeń na cztery odrębne części. Przeszłość obserwatora to trójkątny obszar czasoprzestrzeni ograniczony trajektoriami promieni świetlnych docierających do punktu O . Obszar ten zawiera wszystkie zdarzenia, które nastąpiły i mogą wpływać na to, co widzi obserwator. Przyszłość obserwatora to trójkątny obszar ograniczony promieniami świetlnymi wychodzącymi z O , który zawiera wszystko, na co obserwator może mieć wpływ. Później spotkamy diagramy czasoprzestrzenne zawierające drugi wymiar przestrzeni w płaszczyźnie poziomej. Na takich diagramach ścieżki promieni świetlnych przeszłości i przyszłości w każdym punkcie wyznaczają dwa stożki stykające się wierzchołkami i rozwierające się w przeciwnych kierunkach. Ta struktura stożka świetlnego w każdym punkcie czasoprzestrzeni stanowi istotę fizyki relatywistycznej. Ludzie przyzwyczajeni byli myśleć, że przeszłość i przyszłość po prostu są ze sobą sklezione w teraźniejszości. Ale szczególna teoria względności mówi, że dla nas, obserwatorów, stykają się one tylko w miejscu oznaczającym naszą konkretną lokalizację we wszechświecie.

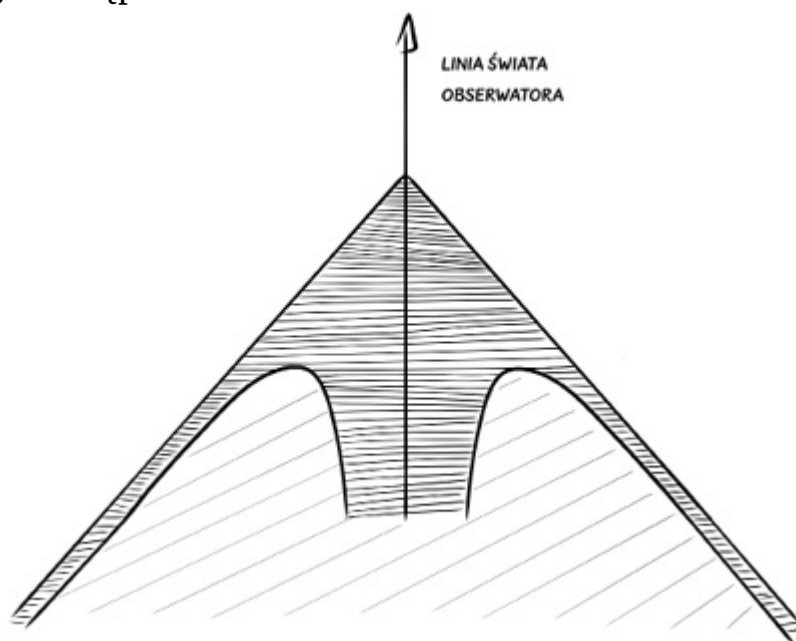


II. 8. Pierwszy wykres Hermanna Minkowskiego skalający czas i przestrzeń w czasoprzestrzeń pochodzący z jego książki *Raum und Zeit* [Przestrzeń i czas] z 1908 roku. Czas i jeden wymiar przestrzeni są oznaczone przerywanymi strzałkami lub „wektorami”. Jedna strzałka wskazuje kierunek czasowy (*zeitartiger Vektor*), a druga kierunek przestrzenny (*raumartiger V.*). Obserwator znajduje się w punkcie *O*. Obszar czasoprzestrzeni w jego przyszłości (*jenseits von O*) jest ograniczony przez *Nachkegel*, a jego przeszłość (*diesseits von O*) przez *Vorkegel*, które są odpowiednio stożkami świetlnymi przyszłości i przeszłości obserwatora.

W newtonowskim świecie zawierającym odrębne i absolutne czas oraz przestrzeń — i pozbawionym kosmicznego ograniczenia prędkości — moglibyśmy, przynajmniej w teorii, mieć natychmiastowy dostęp do całej przestrzeni. W relatywistycznym świecie Einsteina zaczynamy zdawać sobie sprawę, jak niewielka jego część jest dostępna. Obserwowalny wszechświat jest ograniczony zarówno w przestrzeni, jak i w czasie do obszaru naszego stożka świetlnego przeszłości. A biorąc pod uwagę, że od Wielkiego Wybuchu upłynęło zaledwie 13,8 miliarda lat, oznacza to, że istnieje **h o r y z o n t k o s m o l o g i c z n y**, graniczna odległość, poza którą wszystkie wydarzenia we wszechświecie — lub multiświecie — są naprawdę poza naszym zasięgiem, bez względu na to, jak bardzo zaawansowanymi technicznie teleskopami będziemy się posługiwać.

Nawet w obrębie naszego kosmologicznego horyzontu możemy gromadzić

informacje tylko o ograniczonych fragmentach czasoprzestrzeni. Ilustracja 9 pokazuje obszary w obrębie stożka świetlnego przeszłości bezpośrednio dostępne dla obserwatora ziemskiego. Po pierwsze, obserwacje astronomiczne światła dostarczają nam informacji o regionie znajdującym się przy powierzchni stożka świetlnego, prowadząc nas ponad 13 miliardów lat wstecz. Po drugie, obserwacje skamielin ziemskich, cząstek kosmicznych i innych kosmicznych pozostałości pozwalają spojrzeć wstecz około 4,6 miliarda lat do lokalnego wnętrza naszego stożka świetlnego przeszłości. Ale pomiędzy nimi znajdują się rozległe obszary (lekką zaciemnione na il. 9), do których nie mamy bezpośredniego dostępu.



II. 9. Nasz stożek świetlny przeszłości i mocno zaciemnione obszary w naszej przeszłości, do których mamy bezpośredni dostęp.

W 1907 roku Einstein postanowił na nowo przemyśleć prawo powszechnego ciążenia Newtona, aby dostosować nasz opis grawitacji również do swojej nowej wizji czasoprzestrzeni. Okazało się to nie lada wyzwaniem, matematyczną wyprawą, którą później określił jako „długą i samotną podróż przez pustynię w poszukiwaniu w ciemnościach prawdy, którą się wyczuwa, ale której nie da się wyrazić”⁶. Jednak wysiłek się opłacił. W listopadzie 1915

roku, w mrocznych dniach pierwszej wojny światowej, Einstein mógł wreszcie przedstawić swoją ogólną teorię względności, nową teorię grawitacji, zgodną ze szczególną teorią względności czasoprzestrzeni, która stanie się jego najbardziej doniosłym osiągnięciem naukowym.

Ogólna teoria względności opisuje grawitację w terminach geometrycznych — w rzeczywistości jest to geometria samej czasoprzestrzeni⁷. Grawitację traktuje się w niej jako przejaw zakrzywienia czasoprzestrzeni przez masę i energię. Teoria ta mówi na przykład, że Ziemia porusza się wokół Słońca nie dlatego, że istnieje tajemnicza siła działająca na tak ogromnych odległościach, przyciągająca Ziemię, ale dlatego, że masa Słońca nieco zakrzywia kształt przestrzeni w jego pobliżu. To ugięcie tworzy rodzaj zagłębienia, które prowadzi Ziemię (i inne planety) po eliptycznej orbicie wokół Słońca. Nie widzimy tego zagłębienia, ale je czujemy — to grawitacja! Podobnie, według Einsteina, utrzymujemy nasze stopy na podłożu, ponieważ masa Ziemi tworzy niewielkie zagłębienie w kształcie przestrzeni, w którym nasze ciała niejako próbują ześlizgiwać się w dół, powodując, że odczuwamy nacisk skierowany w górę na nasze stopy. To samo zagłębienie utrzymuje satelity, takie jak Międzynarodowa Stacja Kosmiczna i Księżyc, na stałej orbicie wokół naszej planety.

I nie tylko przestrzeń się zakrzywia, ale także czas, a zjawisko to zostało wykorzystane — w mocno przerysowanej formie — przez reżyserów takich filmów jak *Interstellar*. Kiedy Joseph Cooper i jego załoga wrócili na statek kosmiczny po krótkim pobycie na planecie Miller, odkryli, że Romilly, członek załogi, postarzał się o ponad dwadzieścia trzy lata. Najwyraźniej ogromna masa czarnej dziury w pobliżu planety Miller spowodowała wolniejszy upływ czasu dla odwiedzającej ją załogi.

Potęga Einsteinowskiej ogólnej teorii względności wypływa z faktu, że opisuje ona ten cudowny dialog między materią i energią oraz kształtem czasoprzestrzeni za pomocą równania matematycznego:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

To równanie nie jest trudne do odczytania. Po prawej stronie mamy całą materię i energię w określonym obszarze czasoprzestrzeni, oznaczoną przez $T_{\mu\nu}$. Lewa strona opisuje geometrię, $G_{\mu\nu}$, tego rejonu. Znak równości pośrodku to miejsce, w którym dzieje się magia. Wyraża on z matematyczną precyzją, w jaki sposób geometria czasoprzestrzeni po lewej stronie ($G_{\mu\nu}$) jest powiązana z określoną konfiguracją materii i energii ($T_{\mu\nu}$) po prawej stronie, a związek ten, jak mówi teoria Einsteina, jest tym, czego doświadczamy jako grawitacji. Stąd grawitacja nie występuje w teorii Einsteina jako niezależna siła. Raczej **w y ł a n i a s i ę** z wzajemnego oddziaływania między materią a kształtem czasoprzestrzeni. Jak ujął to amerykański fizyk John Archibald Wheeler: „Materia dyktuje czasoprzestrzeni, jak się zakrzywić. Czasoprzestrzeń dyktuje masie, jak się poruszać”⁸.

Krótko mówiąc, ogólna teoria względności tchnie życie w czasoprzestrzeń. Teoria ta przekształca czasoprzestrzeń z niezmienną newtonowskiej sceny wykraczającej poza nasze rozumienie w elastyczne pole fizyczne. Nawiasem mówiąc, koncepcja pól w fizyce — niewidzialnych substancji wypełniających przestrzeń — pochodzi od genialnego dziewiętnastowiecznego szkockiego eksperymentatora Michaela Faradaya. Krótko potem Maxwell wykorzystał pola do sformułowania swej teorii elektromagnetyzmu. Najbardziej znanym przykładem pola fizycznego jest prawdopodobnie pole magnetyczne, poprzez które magnes wywiera swój wpływ. Dzisiaj fizycy również używają pól do opisywania rodzajów cząstek i sposobu ich oddziaływania. Z grubsza myślimy o cząstkach jako o gęstych grudkach właściwego dla nich pola wypełniającego przestrzeń. Geniusz Einsteina wyraził się w określeniu samej czasoprzestrzeni jako pola fizycznego odpowiedzialnego za grawitację.

Nie minęło wiele czasu i już pojawiło się wsparcie dla ogólnej teorii

względności. Pierwsze dowody pochodziły z Układu Słonecznego i dotyczyły toru Merkurego. Kiedy w połowie XIX wieku Le Verrier wskazał astronomom Neptuna, zauważył również, że kształt orbity Merkurego nieznacznie odbiega od tego, co przewidywało Newtonowskie prawo powszechnego ciążenia. Nic dziwnego, że Le Verrier zasugerował, iż na trajektorię Merkurego może mieć wpływ inna planeta znajdująca się jeszcze bliżej Słońca, i nawet wymyślił dla niej nazwę — Wulkan. Ale Wulkan nigdy nie został odkryty. Tak więc w 1915 roku Einstein postanowił ponownie obliczyć orbitę Merkurego na podstawie swojej nowej teorii grawitacji i stwierdził, że doskonale wyjaśnia ona „anomalię Merkurego”. Odkrycie to nazwał najsilniejszym emocjonalnym doświadczeniem swojego życia — „jak gdyby przemówiła natura”⁹.

Jednak prawdziwy przełom w ogólnej teorii względności nastąpił w 1919 roku, kiedy brytyjski astronom sir Arthur Eddington popłynął na portugalską Wyspę Książęcą u wybrzeży Afryki Zachodniej, aby zmierzyć pozycje gwiazd podczas całkowitego zaćmienia Słońca. Jeśli Einstein miał rację i masa zakrzywia czasoprzestrzeń, to światło gwiazdy przechodzące w pobliżu masywnego obiektu takiego jak Słońce nie powinno poruszać się po linii prostej, ale odchyłać się, powodując niewielkie przesunięcie pozycji gwiazdy na niebie. I ku zaskoczeniu wszystkich dokładnie to odkryli Eddington i jego zespół: gwiazdy uległy przesunięciu. Reportaż w „The New York Times” o obserwacjach Eddingtona, opatrzony sensacyjnym nagłówkiem: „Światła zakrzywione w niebiosach, ludzie nauki przejęci”, przyniósł Einsteinowi międzynarodową sławę geniusza, który zdetronizował Newtona¹⁰. Okazało się, że prawa Newtona niegdyś uważane za prawdy ostateczne były tymczasowe i przybliżone. To, że brytyjski astronom przetestował teorię niemieckich fizyków, było nawet traktowane jako akt pojednania między obydwoma krajami, które niedawno walczyły ze sobą podczas pierwszej wojny światowej.

Ugięcie światła w pobliżu Słońca jest niewielkie — kilka sekund kątowych — ponieważ jego pole grawitacyjne jest słabe jak na standardy astronomiczne.

Ale prawie dokładnie sto lat później, wiosną 2019 roku, na stronach głównych serwisów informacyjnych całego świata pojawił się efektowny, przypominający uśmiechniętą twarz obrazek, ukazujący zakrzywienie światła w jego najbardziej ekstremalnej formie. We współczesnej wersji ekspedycji Eddingtona międzynarodowy zespół astronomów stworzył wirtualny teleskop o rozmiarze Ziemi, Teleskop Horyzontu Zdarzeń, składający się z ośmiu anten radioteleskopowych na całym świecie, od Grenlandii po Antarktydę, działających wspólnie w celu osiągnięcia rozdzielczości przestrzennej pozwalającej na dostrzeżenie piłki tenisowej na Księżycu. Kiedy astronomowie wykonali zbliżenie za pomocą Teleskopu Horyzontu Zdarzeń i całą jego zdolność rozdzielczą skierowali na samo centrum obiektu Messier 87 — dużej galaktyki w gromadzie w Pannie oddalonej o około 55 milionów lat świetlnych — a następnie cyfrowo połączyli ze sobą piksele, wyłonił się z nich ciemny dysk otoczony pierścieniem światła — znak rozpoznawczy cienia gigantycznej czarnej dziury pochłaniającej materię.

Ciemny dysk na ilustracji 10 wskazuje, że istnieje centralny obszar, w którym zakrzywienie czasoprzestrzeni jest tak niewiarygodnie silne, że zapuszczające się tam promienie światła nie tylko są odchylane, ale zostają uwięzione wewnątrz. Otaczający go pierścień światła powstaje z materii i gazu rozgrzewających się podczas spadania do czarnej dziury. Ta konkretna czarna dziura wiruje w taki sposób, że światło docierające do nas spod czarnego dysku zyskuje energię, dzięki czemu dolna część świeci jaśniej. Z masą 6,5 miliarda Słońc, stłoczoną w obszarze mniej więcej wielkości Układu Słonecznego, jest to jedna z cięższych czarnych dziur w naszym kosmicznym sąsiedztwie.



II. 10. To pierwsze zdjęcie czarnej dziury wykonane przez Teleskop Horyzontu Zdarzeń w 2019 roku zachwyciło cały świat. Centralny „cień” jest nie większy od naszego Układu Słonecznego, ale zawiera masę około 6,5 miliarda Słońc. Znajduje się w centrum galaktyki Messier 87, około pięćdziesięciu pięciu milionów lat świetlnych od nas. Świetlista otoczka pochodzi z materii wpadającej do czarnej dziury, a cień to miejsce, w którym zakrzywienie przestrzeni jest tak potężne, że całe światło zostaje wessane do środka.

Ogólna teoria względności w zasadzie przewiduje istnienie czarnych dziur. Zaledwie kilka miesięcy po przełomowej publikacji Einsteina niemiecki astronom Karl Schwarzschild znalazł pierwsze rozwiązanie definiującego tę teorię równania (s. 80) opisującego silnie zakrzywioną geometrię na zewnątrz niezwykle gęstej, idealnie kulistej masy M . Ponieważ w tym czasie Schwarzschild służył na froncie rosyjskim pierwszej wojny światowej, zapisał swoje rozwiązanie na pocztówce i wysłał ją Einsteinowi do Berlina. Einstein oczywiście bardzo się ucieszył i entuzjastycznie przedstawił to rozwiązanie Akademii Pruskiej.

Geometria Schwarzschilda zawierała najbardziej osobliwą powierzchnię, znajdującą się w odległości $2GM/c^2$ od środka masy¹¹. Na tej powierzchni

przestrzeń i czas wydawały się zamieniać rolami. Przez lata panowało wokół tego odkrycia spore zamieszanie. Einstein uważał, że jest to matematyczna osobliwość tego rozwiązania pozbawiona jakiegokolwiek znaczenia fizycznego. Sam Schwarzschild sądził, że przestrzeń i czas w jakiś sposób kończą swój żywot na tej powierzchni.

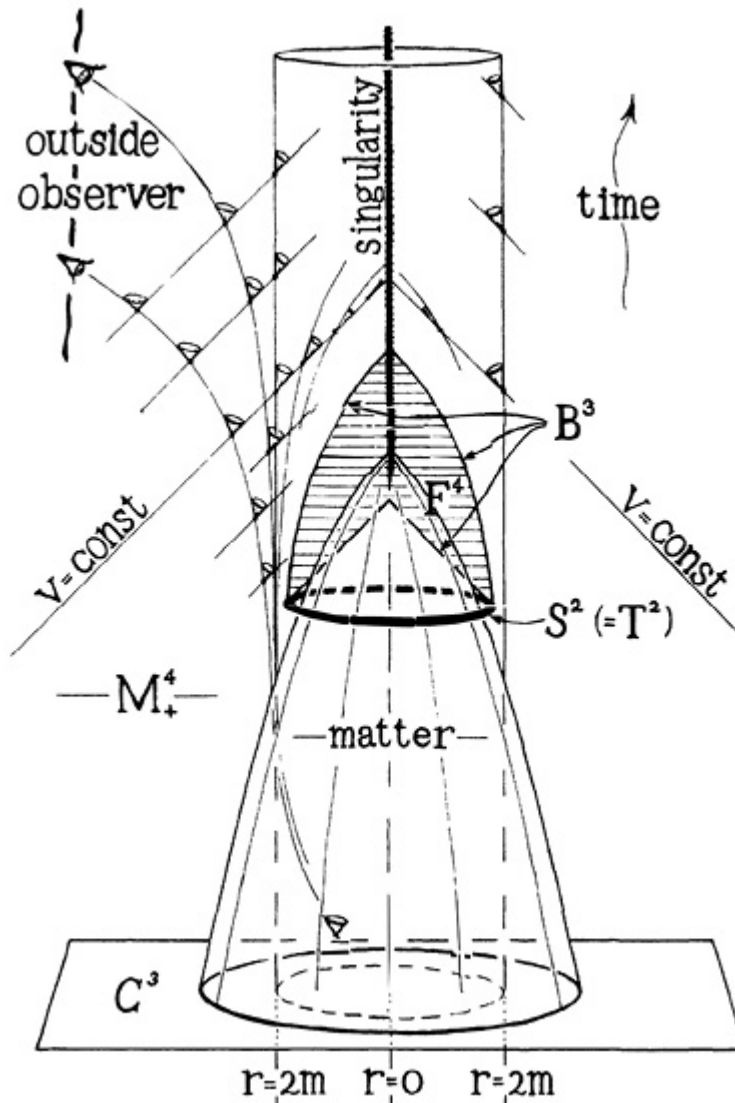
Ale aura tajemniczości otaczająca geometrię Schwarzschilda zaczęła jednak ustępować w latach trzydziestych¹², kiedy stało się jasne, że to rozwiązanie opisuje końcowy kształt czasoprzestrzeni po całkowitym kolapsie grawitacyjnym dużej, idealnie kulistej gwiazdy, kiedy kończy się jej paliwo i umiera¹³.

Oczywiście prawdziwe gwiazdy nie są idealnie kuliste, więc większość fizyków pozostała sceptyczna w kwestii istnienia takich „grawitacyjnie zapadniętych gwiazd”. Dopiero po renesansie ogólnej teorii względności w latach sześćdziesiątych, zapoczątkowanym pracami Rogera Penrose’a, fizyczna rzeczywistość grawitacyjnie zapadniętych gwiazd zaczęła wreszcie być traktowana poważnie, a Wheeler do ich opisu ukuł termin **c z a r n a d z i u r a**. Penrose, czysty matematyk pracujący w Birkbeck College w Londynie, wprowadził zupełnie nowy zestaw sprytnych narzędzi do radzenia sobie ze skomplikowanymi geometriami ogólnej teorii względności i udowodnił, że wszystkie **w y s t a r c z a j ą c o** masywne gwiazdy — niezależnie od ich początkowego kształtu czy składu — pod koniec życia zapadają się do czarnej dziury. Oznaczało to, że pomimo swej matematycznej dziwaczności czarne dziury powinny stanowić integralną część kosmicznego ekosystemu. W artykule z 1969 roku Penrose napisał: „Chciałbym jedynie zaapelować o poważne traktowanie czarnych dziur i szczegółowe zbadanie konsekwencji ich istnienia. Bo któż jest w stanie powiedzieć, że nie mogą odegrać jakiejś ważnej roli w kształtowaniu obserwowanych zjawisk?”¹⁴. Te uwagi okazały się prorocze. Obserwacje astronomiczne w ciągu następnych kilku dekad stopniowo wzmacniały argumentację popierającą istnienie czarnych dziur, czego kulminacją stały się pierwsze niewyraźne obrazy tych

zagadkowych obiektów wykonane w 2019 roku. Pięćdziesiąt pięć lat po swej przepowiedni, że czarne dziury powinny być wszechobecne we wszechświecie, Penrose otrzymał Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki w 2020 roku za coś, co początkowo było odkryciem czysto teoretycznym.

Nagrodzony artykuł Penrose'a z 1965 roku¹⁵ liczył zaledwie trzy strony i zawierał niewiele równań, natomiast znajduje się w nim zachwycająca, przypominająca dzieła Leonarda daVinci ilustracja powstawania czarnej dziury (zob. il. 11). Diagram czasoprzestrzenny Penrose'a przedstawia dwa wymiary przestrzenne oraz ich przeplatanie z wymiarem czasu. Możemy zobaczyć, że daleko od obiektu stożki świetlne przyszłości rozwierają się na obie strony, co oznacza, że promienie światła mogą podążać albo w kierunku gwiazdy, albo w przeciwnym — jak można się spodziewać. W pobliżu zapadającej się gwiazdy jej masa zakrzywia przestrzeń, powodując wygięcie stożków świetlnych do wewnątrz. W miarę zapadania pojawia się szczególna powierzchnia, na której stożki odginają się tak bardzo, że nawet promienie świetlne skierowane na zewnątrz, poruszające się z prędkością światła, pozostają w stałej odległości od środka gwiazdy. A ponieważ nic nie może poruszać się szybciej niż światło, nic innego nie może uciec z jej pola grawitacyjnego. Zapadająca się gwiazda tworzy obszar w czasoprzestrzeni, który jest całkowicie odseparowany od reszty wszechświata — czarną dziurę.

Powierzchnia oddzielająca wewnętrzną strefę bez ucieczki od reszty wszechświata jest osobliwą powierzchnią w geometrii Schwarzschilda, która spowodowała tak wiele zamieszania w początkach ogólnej teorii względności. Dziś nazywamy ją **h o r y z o n t e m z d a r z e ń** czarnej dziury. Odpowiada mniej więcej krawędzi ciemnego dysku przedstawionego na ilustracji 10. Horyzont zdarzeń działa jak jednokierunkowa membrana, przez którą materia, światło i informacje mogą trafić do środka, ale nic nie zdoła wydostać się na zewnątrz. Czarne dziury to w istocie ostateczna gra escape room.



II. 11. Ilustracja Rogera Penrose'a z 1965 roku przedstawiająca zapadającą się gwiazdę tworzącą czarną dziurę. Gdy gwiazda się kurczy, w pustej przestrzeni wokół niej pojawia się szczególna powierzchnia, pokazana jako czarny pierścień w środku rysunku. Na tej powierzchni nawet światło nie może uciec z gwiazdy. Penrose wykazał na podstawie czysto matematycznych rozważań, że niezależnie od jej kształtu pojawienie się powierzchni więżącej światło sygnalizuje nieuniknione powstanie czarnej dziury z osobliwością w środku otoczoną cylindrycznym horyzontem zdarzeń. Wewnątrz czarnej dziury ekstremalne nachylenie stożków świetlnych oznacza, że można podążać tylko w kierunku osobliwości. Jednak nachylenie to oznacza również, że zewnętrzny obserwator nigdy nie zaobserwuje ostatnich etapów kolapsu, nie mówiąc o osobliwości wewnątrz czarnej dziury.

[Objaśnienia angielskich terminów: *outside observer* – obserwator zewnętrzny, *singularity* – osobliwość, *time* – czas, *matter* – materia].

Niewielu fizyków uważa, że na horyzoncie zdarzeń czarnych dziur można zobaczyć lub doświadczyć czegoś ciekawego, ale ma on ogromne znaczenie dla przyczynowej struktury czarnej dziury. Wewnątrz powierzchni horyzontu przestrzeń i czas w pewnym sensie zmieniają swą tożsamość. Gdyby nieustraszony astronauta zapuścił się pod horyzont czarnej dziury, coraz większe nachylenie stożków świetlnych sprawiałoby, że musiałby się poruszać w kierunku środka. Oznacza to, że przestrzenny wymiar wzdłuż promienia wewnątrz czarnej dziury nabiera właściwości wymiaru czasu, kierunku, w którym nie da się zatrzymać ani cofnąć, lecz można podążać tylko w przód. Osobliwość czasoprzestrzeni o nieskończonej krzywiznie, która znajduje się w centrum, nie jest tak naprawdę miejscem w przestrzeni, lecz raczej chwilą w czasie — ostatnią.

Owa osobliwość z jej nieskończonym zakrzywieniem to miejsce, gdzie (kiedy) równanie Einsteina traci swoją zdolność predykcyjną. Ogólna teoria względności załamuje się w osobliwościach czasoprzestrzennych. To zastanawiające. Jak Penrose był w stanie udowodnić, że grawitacyjne zapadanie się dużej gwiazdy powoduje powstanie osobliwości, skoro ramy teoretyczne, na których się opierał, nie mają zastosowania w osobliwościach? Pomysłowość podejścia Penrose'a polegała na wyznaczeniu punktu bez powrotu w kolapsie grawitacyjnym, którego powstawanie nazwał **p o w i e r z c h n i ą u w i ę z i o n ą**, skąd nawet światło nie może się oddalić od gwiazdy. Penrose wykazał, że gdy uformuje się powierzchnia uwięziona, dalsze zapadanie się do osobliwości jest nieuniknione. Jego matematyczne sztuczki były tak potężne, że pozwoliły mu przewidzieć wynik, mimo że nie był w stanie śledzić zapadania prawdziwej gwiazdy aż do samego końca.

Co się jednak stanie, gdy dwie czarne dziury wejdą w sferę swoich wpływów i zaczną się nawzajem okręzać? Ogólna teoria względności przewiduje, że to oddziaływanie powoduje powstanie fal grawitacyjnych, oscylujących zaburzeń czasoprzestrzeni, rozchodzących się we wszechświecie z prędkością światła.

Jest to naturalna konsekwencja równania Einsteina: dwie krążące wokół siebie czarne dziury tworzą okresowo zmieniającą się konfigurację mas, która według równania Einsteina powoduje odpowiedź czasoprzestrzeni w postaci jej własnych periodycznych zaburzeń. Te oscylacje to fale grawitacyjne.

Jako zmarszczki geometrii, fale grawitacyjne unoszą ogromne ilości energii. To wysysa energię z układu orbitujących czarnych dziur, co powoduje, że czarne dziury zbliżają się do siebie ruchem spiralnym i ostatecznie zlewają się w pojedynczą, większą czarną dziurę. Takie fuzje czarnych dziur to zdecydowanie najgwałtowniejsze wydarzenia we wszechświecie. Pojedyncze zderzenie dwóch czarnych dziur wytwarza silniejszy impuls fal grawitacyjnych niż łączna moc całego światła emitowanego przez wszystkie gwiazdy w obserwowalnym wszechświecie. Niemniej fale geometrii generowane w zderzeniach czarnych dziur mają wyjątkowo małą amplitudę, ponieważ struktura czasoprzestrzeni jest bardzo sztywna¹⁶. To dlatego właśnie impulsy fal grawitacyjnych pomimo swej ogromnej mocy są niezwykle trudne do wykrycia.

Co więcej, ponieważ w tym procesie nie biorą udziału żadne cząstki, impuls fal grawitacyjnych przechodzących przez naszą planetę będzie niewidoczny, z wyjątkiem chwilowego niewielkiego rozciągnięcia i skurczenia prętów pomiarowych oraz delikatnego przyspieszenia i spowolnienia zegarów, zanim ponownie znikną bez śladu. Aby wykryć tak drobne, ulotne zmiany, potrzebny jest pręt pomiarowy o długości kilku kilometrów, który byłby w stanie zmierzyć tę odległość z dokładnością znacznie większą niż średnica pojedynczego protonu. Wydaje się to niewykonalne. Jednak w oszałamiającym przedsięwzięciu inżynieryjnym dwóm grupom naukowców

pracujących w zespołach LIGO w Stanach Zjednoczonych i VIRGO w Europie udało się to osiągnąć. Wykorzystując lasery i mnóstwo wyrafinowanej technologii służącej do monitorowania długości trzech par kilkukilometrowych rur próżniowych ustawionych w kształt litery L w trzech bardzo odległych od siebie miejscach na Ziemi, oba zespoły zastawiły pomysłową pułapkę na fale grawitacyjne przechodzące przez naszą planetę. A 14 września 2015 roku, po wielu latach oczekiwania i nasłuchiwania, ramiona w kształcie dwóch liter L eksperymentu LIGO nagle zaczęły drgać, początkowo bardzo delikatnie, stopniowo coraz szybciej i mocniej, aż po ułamku sekundy wibracje znów ustąpiły. Korzystając z teorii Einsteina, fizycy byli w stanie przypisać ten krótki wzór drgań impulsowi fali grawitacyjnej wytworzonemu ponad miliard lat temu podczas spiralnego spadania na siebie i połączenia pary czarnych dziur o wadze około trzydziestu mas Słońca każda. Po pięciu latach wykryto już prawie sto takich emisji fal grawitacyjnych, dowodząc tym samym, że czarne dziury naprawdę stanowią integralną część kosmicznego ekosystemu, tak jak przewidywał Penrose.

Obserwacyjne odkrycie fal grawitacyjnych potwierdza ostatnie z wielkich przewidywań ogólnej teorii względności Einsteina. Pod wieloma względami oznacza ono dojrzałość tej teorii, ponieważ sygnalizuje w równym stopniu nowy początek i koniec pewnej epoki. To, co rozpoczęło się jako abstrakcyjne równanie matematyczne opisujące przestrzeń, czas i grawitację, dzięki obserwacjom fal grawitacyjnych rozwinęło się w zupełnie nowy sposób patrzenia na wszechświat. Ponad pięć wieków po tym, jak Galileusz po raz pierwszy skierował teleskop na gwiazdy, astronomowie wykształcili nowy zmysł, który mogą wykorzystać do odkrycia mrocznej strony wszechświata zdominowanej przez czarne dziury, ciemną materię i ciemną energię. Obserwatoria fal grawitacyjnych działające obecnie na całym świecie badają wszechświat, analizując geometrię samej czasoprzestrzeni i wychwytyując drobne drgania pola, które Einstein powołał do życia ponad sto lat temu.

W pionierskich czasach ogólnej teorii względności Einstein szybko zdał sobie sprawę, że jego teoria może zawierać radykalnie nową wizję kosmosu jako całości. W 1917 roku napisał do wybitnego holenderskiego astronoma Willema de Sittera pracującego w Lejdzie: „Pragnę rozstrzygnąć kwestię, czy podstawową ideę teorii względności można zastosować do samego końca i określić kształt wszechświata jako całości”¹⁷.

Einstein zasugerował, że całościowy kształt przestrzeni przypomina trójwymiarową wersję powierzchni kuli — tak zwaną **hipersferę**. Trudno ją sobie wyobrazić, ponieważ zwykle myślimy o zakrzywionych przestrzeniach jako dwuwymiarowych powierzchniach zanurzonych w normalnej trójwymiarowej przestrzeni euklidesowej. Ale to zanurzenie powierzchni w większej przestrzeni jest tylko po to, by przynieść ulgę oczom. Już dziewiętnastowieczni matematycy dowiedli, że wszystkie właściwości geometryczne zakrzywionych powierzchni — takie jak linie proste, kąty i tak dalej — można zdefiniować wewnątrz, bez odwoływania się do czegokolwiek poza taką powierzchnią¹⁸. Podobnie zakrzywiony kształt trójwymiarowej hipersfery nie wymaga zewnętrznego punktu odniesienia. Jest ona dokładnie tym, czym jest: hipersferą.

Podobnie jak powierzchnia kuli, trójwymiarowa hipersfera nie ma środka ani brzegu. Przestrzeń wygląda tak samo z każdego jej punktu. Jednak całkowita objętość przestrzeni we wszechświecie Einsteina jest skończona. A zatem podobnie jak Ziemia ma skończoną powierzchnię, liczba różnych miejsc we wszechświecie hipersferycznym również jest ograniczona. W rezultacie, jeśli będziecie podróżować wzdłuż linii prostej we wszechświecie Einsteina, w końcu wrócicie do punktu wyjścia z przeciwnego kierunku do tego, w którym wyruszyliście, tak samo jak możecie oblecieć kulę ziemską dookoła, cały czas kierując się prosto przed siebie.

Co więcej, nic by się nie zmieniło, ponieważ Einstein zaprojektował swój wszechświat tak, aby był niezmienny w czasie. Aby uzyskać taki wynik, dodał nawet do swojego równania dodatkowy wyraz, który nazwał członem

kosmologicznym i oznaczył grecką literą λ , znaną dziś jako stała kosmologiczna. Einsteinowski człon λ opisuje ciemną energię przestrzeni, która przejawia swoje działanie w największych skalach wszechświata, gdzie staje się źródłem pewnego rodzaju antygravitacji albo kosmicznego odpychania. Einstein zauważył, że dla hipersfery o określonej wielkości przyciąganie grawitacyjne całej materii i odpychanie wywołane członem λ mogą się idealnie zrównoważyć, dając wszechświat, który ani się nie rozszerza, ani nie kurczy i istnieje nieskończenie długo w przeszłości i przyszłości. Był to kosmos, którego poszukiwał i według niego jedyny zgodny z głębszym fizycznym znaczeniem jego teorii.

Osiągnięcie Einsteina pozwalające opisać cały kosmos przy użyciu jednego równania wyraźnie pokazało, że ogólna teoria względności może nas doprowadzić tam, gdzie nie mają wstępu prawa Newtona. Jego statyczna, hipersferyczna czasoprzestrzeń wiąże swój całościowy kształt i wielkość z ilością zawartej w nim materii i energii, dowodząc tym samym, że ogólna teoria względności naprawdę miała potencjał do dostarczenia fantastycznych odpowiedzi na odwieczne pytania. Dzięki swojemu podejściu do wszechświata jako całości Einstein w pewnym sensie wprowadził zewnętrzną sferę starożytnych modeli świata do królestwa współczesnej nauki. I mimo że Einsteinowski model wszechświata okazał się mocno chybiony, jego pionierskie badania oznaczały narodziny współczesnej kosmologii relatywistycznej.

Minęło jednak jeszcze dziesięć lat, zanim Lemaître zaczął dostrzegać, że prawdziwe kosmologiczne implikacje teorii względności wykraczają daleko poza to, co wyobrażali sobie Einstein i wszyscy inni.

Lemaître był ciekawą i sympatyczną postacią¹⁹. Urodzony w 1894 roku w Charleroi na południu Belgii, musiał porzucić studia inżynierskie, aby rozpocząć służbę wojskową podczas pierwszej wojny światowej. Kiedy Niemcy najechały Belgię w sierpniu 1914 roku, młody Georges zgłosił się na

ochotnika do służby w piechocie armii belgijskiej i brał udział w bitwie nad Yser, w pobliżu granicy z Francją. Walki ciągnęły się przez dwa miesiące, aż Belgowie zalali ten obszar, aby powstrzymać niemieckie natarcie. Ponoć w spokojniejszych okresach Lemaître starał się zrelaksować w okopach, czytając klasyczne dzieła fizyki, w tym *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques* Poincarégo. Legenda rodzinna głosi, że ściągnął na siebie gniew pewnego instruktora wojskowego, gdy wskazał błąd matematyczny w podręczniku balistyki wojskowej.

W odpowiedzi na podwójne powołanie Lemaître po wojnie zapisał się na Katolicki Uniwersytet w Louvain, aby uczyć się fizyki, oraz wstąpił do seminarium w Malines, gdzie otrzymał specjalne pozwolenie od kardynała Merciera na studiowanie nowej teorii względności Einsteina. W 1923 roku w kolaratce przekroczył kanał la Manche, aby pracować z Eddingtonem w Obserwatorium Cambridge.

Będąc zapalonym czytelnikiem dzieł filozoficznych i fizycznych, Lemaître mógł się zainspirować wizją osiemnastowiecznego szkockiego filozofa Davida Hume'a przy wypracowaniu sobie naukowego podejścia na styku teorii matematycznej i obserwacji astronomicznych. W swoim arcydziele *Badania dotyczące rozumu ludzkiego* Hume stwierdził, że nasze doświadczenia są podstawą naszej wiedzy. Doceniając potęgę matematyki, Hume przestrzegał przed abstrakcyjnym rozumowaniem oderwanym od realnego świata. „Jeśli rozumiemy *a priori*, dowolna rzecz może okazać się zdolna do wytworzenia jakiegokolwiek innej rzeczy. Upadek kamyka może więc zagasić słońce, a życzenie człowieka — kontrolować ruch planet po ich orbitach”. Kładąc nacisk na doświadczenie jako podstawę wszystkich naszych teorii, Hume pomógł położyć podwaliny pod praktykę naukową jako proces indukcyjny zakorzeniony w eksperymencie i naszych obserwacjach wszechświata.

W podobnym duchu Lemaître podsumował swoje stanowisko w następujący sposób: „Każdy pomysł pochodzi w jakiś sposób z realnego

świata, zgodnie z powiedzeniem: *Nihil est in intellectu nisi prius fuerit in sensu*²⁰. Z pewnością idea wyrastająca z faktu musi wyjść poza niego i podążyć za naturalnym tokiem myśli, co stanowi podstawową działalność intelektu. Jest to jednak być może jedna z najcenniejszych lekcji, jaką daje nam niezwykłość fizyki: ten tok musi być kontrolowany, nie może tracić kontaktu z faktami, musi pozwalać się przez nie uwarunkować. Tutaj — podobnie jak w wielu innych dziedzinach — musimy znaleźć odpowiednią równowagę między marzycielskim idealizmem, który błądzi, a wąskim pozytywizmem, który pozostaje bezpłodny”²¹.

Przeprowadzając się z Cambridge w Anglii do Cambridge w stanie Massachusetts, aby pracować w Obserwatorium Harvard College, Lemaître był świadkiem rozstrzygnięcia „wielkiej debaty” w Waszyngtonie w styczniu 1925 roku. Pytanie brzmiało, czy mgławice spiralne na niebie — znane od średniowiecza — były gigantycznymi obłokami gazu wewnątrz Drogi Mlecznej, czy też oddzielnymi, odległymi galaktykami. Używając nowego 2,5-metrowego teleskopu Hookera na Mount Wilson w pobliżu Pasadeny, ówczesnego najpotężniejszego teleskopu na świecie, amerykański astronom Edwin Hubble i jego koledzy rozdzielili fragmenty dwóch mgławic (Andromedy i Trójkąta) na pojedyncze gwiazdy, a następnie wykorzystali charakterystyczne właściwości pulsujących cefeid, aby oszacować ich odległości²². Ku ich zdumieniu okazało się, że znajdowały się blisko milion lat świetlnych od nas. Tak wielkie dystanse umieszczały je daleko poza brzegiem Drogi Mlecznej i tym samym potwierdzały, że są oddzielnymi galaktykami. Za jednym zamachem obserwacje Hubble’a powiększyły wszechświat tysiąckrotnie!

Co więcej, większość mgławic wydawała się od nas oddalać. Już w 1913 roku utalentowany astronom Vesto Slipher, pracujący w Obserwatorium Lowella²³ w pobliżu Wielkiego Kanionu, zauważył, że widma światła większości mgławic spiralnych były przesunięte w kierunku większych długości fal²⁴. Takie przesunięcie występuje, gdy obserwuje się światło

z oddalającego się źródła, a znane jest jako zjawisko Dopplera. Wiemy, czym jest przesunięcie dopplerowskie dla fal dźwiękowych — przypomnijmy sobie zmianę wysokości dźwięku syreny mijającej nas karetki pogotowia. Ale to samo zjawisko dotyczy również fal świetlnych, gdzie powoduje poczerwienienie barwy światła, co w kosmologii trafnie nazywa się **przesunięciem ku czerwieni**. W połowie lat dwudziestych Slipher zmierzył widma co najmniej czterdziestu dwóch mgławic spiralnych i stwierdził, że tylko cztery zbliżały się do Drogi Mlecznej, podczas gdy pozostałe oddalały się od niej, często z ogromnymi prędkościami rzędu 1800 kilometrów na sekundę, znacznie większymi niż prędkości jakiegokolwiek innego obiektu kosmicznego znanego w tamtym czasie. Z perspektywy czasu prędkości mgławic podane w tablicach Sliphera, takich jak pokazana na ilustracji 12, były najwcześniejszymi dowodami rozszerzania się wszechświata²⁵.

Po powrocie do Louvain w 1925 roku Lemaître zrozumiał znaczenie obserwacji Sliphera. Mówi się, że znał wtedy ogólną teorię względności lepiej niż ktokolwiek inny, łącznie z Eddingtonem i Einsteinem. Lemaître zauważył, że statyczny wszechświat skonstruowany przez Einsteina jest bardzo niestabilny. Przypominał kosmologiczny odpowiednik szpilki ustawionej na główce — wystarczy ją lekko trącić, a zacznie spadać. Przebłyskiem geniuszu Lemaître'a okazało się porzucenie głęboko zakorzenionej idei niezmiennego wszechświata, który jest taki sam przez całą wieczność, i odczytanie w języku ogólnej teorii względności tego, co przez cały czas starała się przekazać: że wszechświat się rozszerza. Wiążąc masę i energię z kształtem czasoprzestrzeni, teoria Einsteina nieuchronnie powoduje zmianę przestrzeni w czasie — nie tylko lokalnie, ale także szerzej, w skali całego kosmosu. Lemaître wywnioskował, że projektując statyczny świat, Einstein odrzucił najbardziej radykalne przewidywanie własnego równania na rzecz swych filozoficznych uprzedzeń dotyczących tego, jak **powinien** wyglądać kosmos. Przełomowy artykuł Lemaître'a z 1927 roku, w którym przewidział,

że przestrzeń się rozszerza, ustanowił fundamentalny związek między ogólną teorią względności a zachowaniem fizycznego wszechświata jako całości²⁶. Sam wspominał z charakterystyczną nonszalancją: „Byłem bardziej matematykiem niż większość astronomów i bardziej astronomem niż większość matematyków”²⁷.

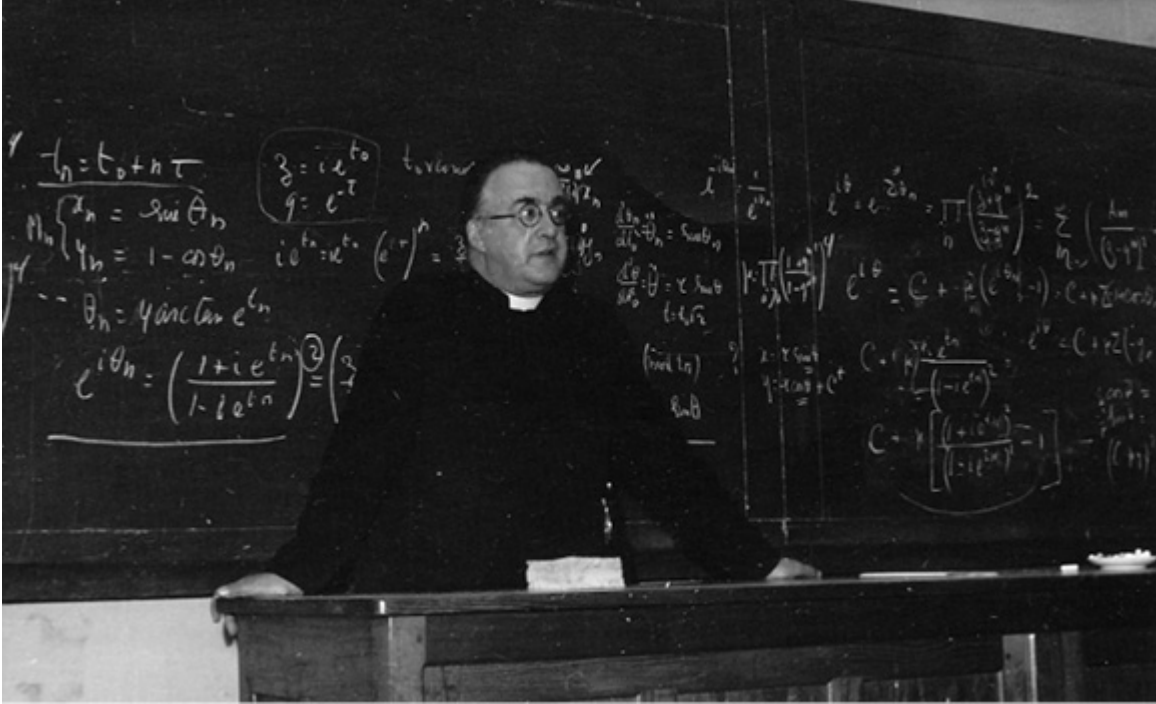
TABLE I.
RADIAL VELOCITIES OF TWENTY-FIVE SPIRAL NEBULÆ.

Nebula.	Vel.	Nebula.	Vel.
N.G.C. 221	— 300 km.	N.G.C. 4526	+ 580 km.
224	— 300	4565	+ 1100
598	— 260	4594	+ 1100
1023	+ 300	4649	+ 1090
1068	+ 1100	4736	+ 290
2683	+ 400	4826	+ 150
3031	— 30	5005	+ 900
3115	+ 600	5055	+ 450
3379	+ 780	5194	+ 270
3521	+ 730	5236	+ 500
3623	+ 800	5866	+ 650
3627	+ 650	7331	+ 500
4258	+ 500		

II. 12. Najwcześniejszy dowód rozszerzania się wszechświata. Pokazane są prędkości radialne dwudziestu pięciu mgławic spiralnych (galaktyk), opublikowane przez Vesto Sliphera w 1917 roku. Wartości ujemne odpowiadają zbliżającym się galaktykom, natomiast dodatnie prędkości należą do galaktyk, które się oddalają.

Lemaître zrozumiał, że rozszerzający się wszechświat bardzo różni się od zwykłej eksplozji. Wybuch ma początek w określonym miejscu. Jeśli weźmiemy na przykład pod uwagę daleką eksplodującą gwiazdę, przestrzeń będzie wyglądać zupełnie inaczej w zależności od tego, czy patrzymy w kierunku gwiazdy czy od niej. Zupełnie inaczej sprawy się mają w przypadku rozszerzającego się wszechświata. Wszechświat podlegający ekspansji nie ma środka ani brzegu, gdyż to sama przestrzeń się rozciąga. Jeśli już, ekspansja jest eksplozją samej przestrzeni. „Mgławice [galaktyki] są jak mikroby na powierzchni balonu” — wyjaśniał Lemaître. „Kiedy balon rośnie,

każdy mikrob widzi, że inne się od niego oddalają, i ma wrażenie — ale tylko wrażenie — bycia w centrum”. Rysunkowa ilustracja metafory Lemaître’a ukazała się w holenderskiej gazecie w 1930 roku (zob. fot. 2 na wklejce).



II. 13. Georges Lemaître podczas wykładu na Katolickim Uniwersytecie w Louvain (Belgia).

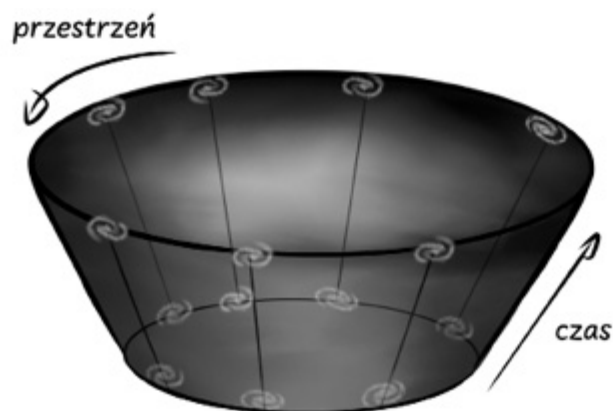
Podczas gdy fale świetlne przemieszczają się od jednego „mikroba” do drugiego, ich długości rozciągają się wraz z rozszerzającą się przestrzenią, cały czas przesuwając kolor światła w kierunku czerwieni. To sprawia, że odległe galaktyki pozornie oddalają się od Drogi Mlecznej, mimo że się nie poruszają. Dlatego przesunięcia ku czerwieni widm mgławic nie są prawdziwymi przesunięciami Dopplera spowodowanymi rzeczywistymi ruchami galaktyk, jak sądzili Slipher i Hubble, ale konsekwencją rozszerzania się samej przestrzeni (zob. il. 14). Ponieważ nie mogę zmieścić wszystkich wymiarów na kartce papieru, ponownie usunąłem dwa wymiary przestrzenne, pozostawiając tylko jeden, przedstawiony tutaj jako okrąg. Wnętrze koła i przestrzeń poza nim nie są częścią tego wszechświata, lecz jedynie służą

wizualizacji. Mamy więc jednowymiarowy okrąg, który się rozciąga: promień okręgu z biegiem czasu się powiększa. Widzimy, że zwiększa to odległości między galaktykami, mimo że tak naprawdę się nie poruszają.

Wielkość obserwowanego przez nas przesunięcia ku czerwieni zależy od tego, jak dawno — a więc jak daleko — odbierane przez nas światło zostało wyemitowane. Lemaître obliczył, że jeśli wszechświat rozszerza się w stałym tempie, to musi istnieć liniowa zależność między pozorną prędkością ucieczki v galaktyki, a jej odległością r od nas, co podsumował w słynnym równaniu 23 swojej pracy z 1927 roku:

$$v = H r.$$

Ta zależność mówi, że pozorna prędkość v , z jaką galaktyki się oddalają, powinna być proporcjonalna do ich odległości r od nas. Współczynnik proporcjonalności H w tej relacji jest liczbą wyznaczającą tempo rozszerzania się wszechświata. Szukając obserwacyjnego potwierdzenia swojej hipotezy, Lemaître sprawdził przesunięcia ku czerwieni wyznaczone przez Sliphera i pomiary odległości wykonane przez Hubble'a (wysoco niepewne) dla próbki czterdziestu dwóch mgławic, i oszacował, że galaktyki oddalają się około 575 kilometrów na sekundę szybciej na każde trzy miliony lat świetlnych odległości²⁸.



II. 14. Schematyczne przedstawienie jednowymiarowego wszechświata w kształcie okręgu, który rozszerza się w czasie. Rozszerzanie się przestrzeni

powoduje, że galaktyki oddalają się od siebie, mimo że tak naprawdę się nie poruszają. W wyniku tego pozornego ruchu światło obserwowanych przez nas galaktyk wydaje się przesunięte ku czerwieni.

To odkrycie zapoczątkowało największą zmianę paradygmatu w kosmologii od czasów Newtona. Jednak mało kto to zauważył, a kilka uwag, które dotarły do Lemaître'a, nie było zachęcających. Wysłał kopię swojej pracy do Eddingtona, który ją zgubił. Einstein, manipulując swoją teorią tak, by wszechświat pozostał nieruchomy, odmówił ponownego rozważenia tej kwestii. Podczas ich krótkiego, nerwowego spotkania w kuluarach Piątego Kongresu Solvaya w 1927 roku²⁹ zwrócił Lemaître'owi uwagę, że rozwiązanie równania opisującego rozszerzające się wszechświaty odkrył cztery lata wcześniej młody matematyk z Sankt Petersburga, Aleksander Aleksandrowicz Friedmann³⁰, który w tamtym czasie już nie żył. Dla Einsteina (i dla Friedmanna) takie rozwiązania były tylko matematycznymi osobliwościami teorii względności, bez żadnego znaczenia dla realnego kosmosu. Statyczny wszechświat wydawał się o wiele doskonalszy i przyjemniejszy emocjonalnie. Z tego, co wiemy, gdy Friedmann zmarł, Einstein odrzucił ten pomysł, a Eddington był nieświadomy odkryć Lemaître'a, pod koniec lat dwudziestych tylko jedna osoba na planecie rozumiała to, co ostatecznie okazało się najdalej idącym przewidywaniem ogólnej teorii względności.

Jednak Lemaître nie zraził się i postanowił zbadać sposób wzrostu wszechświata. Pracując w swoim domu w Louvain — byłym browarze — prześledził ewolucję wielkości trójwymiarowej hipersfery³¹ wypełnionej różną ilością materii i ciemnej energii. Fotografia 1 na wklejce pokazuje zakres znalezionych przez niego wszechświatów, z których każdy rozszerza się i ewoluuje zgodnie z ogólną teorią względności. Wykresy te — wykonane szczegółowo na żółtym papierze milimetrowym przez Lemaître'a w 1929 lub 1930 roku — stanowią jeden z najważniejszych dokumentów naukowych XX

wieku. Wykresy Lemaître'a — imponujące w sensie odejścia od panującego światopoglądu — dosłownie zmieniły świat.

W 1929 roku Hubble, mając do dyspozycji najpotężniejszy na świecie teleskop na Mount Wilson, dostarczył na tyle mocnych dowodów empirycznych na liniową zależność odległości i prędkości, że ten związek — równanie 23 w artykule Lemaître'a z 1927 roku — nazwano **p r a w e m H u b b l e ' a**³². Stało się tak pomimo faktu, że Hubble nie wspominał o rozszerzaniu wszechświata i zszedł z tego świata, nie wierząc w relatywistyczną interpretację swoich obserwacji³³. Pomijając ten fakt, jego obserwacje były wielkim osiągnięciem. Hubble miał asystenta, Milтона Humasona, byłego poganiacza mułów i jednego z ostatnich zawodowych astronomów bez dyplomu uniwersyteckiego, który podjął heroiczne wysiłki, by uchwycić słabe światło odległych mgławic. Ponoć Humason potrzebował trzy pełne noce starannych obserwacji, by zmierzyć widmo pojedynczej mgławicy.

Spektakularne obserwacje Hubble'a i Humasona okazały się punktem zwrotnym dla kosmologii relatywistycznej. W styczniu 1930 roku Eddington zwołał spotkanie Królewskiego Towarzystwa Astronomicznego w celu omówienia tej sprawy i — przypomniawszy sobie artykuł Lemaître'a z 1927 roku — zlecił opublikowanie angielskiego tłumaczenia w czasopiśmie „Monthly Notices”. W obliczu astronomicznych dowodów Einstein również dał za wygraną. Za jednym zamachem zaakceptował rozszerzanie, odrzucając człon λ , który dodał do swojego równania, aby wszechświat pozostał niezmienny. Oznajmił, że zawsze miał złe przeczucia dotyczące tego członu, który uważał za ogromnie szkodliwy dla matematycznego piękna jego teorii. W nawiązaniu do swej wówczas już pozbawionej dodatkowych ograniczeń teorii napisał do amerykańskiego astronoma Richarda Tolmana: „To jest naprawdę nieporównywalnie bardziej zadowalające”³⁴.

Paradoksalnie Lemaître miał zupełnie inne zdanie. Uważał, że człon λ

Einsteina był genialnym dodatkiem do tej teorii, ale oczywiście nie w celu otrzymania statycznego wszechświata (motywacja Einsteina), lecz po prostu po to, by uwzględnić energię związaną z pustą przestrzenią. Eddington zgodził się w tej kwestii z Lemaître'em, oświadczając w pewnym momencie³⁵: „Wolałbym wrócić do teorii Newtona, niż porzucić stałą kosmologiczną”. Podczas gdy Einstein dodał człon po lewej stronie swojego równania, opierając się na geometrycznych podstawach, Eddington i Lemaître uważali go za część zasobów energetycznych wszechświata po prawej stronie wzoru. Twierdzili, że jeśli czasoprzestrzeń jest polem fizycznym, to czy nie powinniśmy oczekiwać, że posiada własne wewnętrzne właściwości? Stała kosmologiczna to właśnie czyni: wypełnia czasoprzestrzeń energią i ciśnieniem. Tak jak naczynie z wodą zawiera pewną ilość energii, której miarą jest jej temperatura, tak samo człon λ obdarza pustą przestrzeń pewną ilością ciemnej energii i ciemnego ciśnienia wyznaczaną przez liczbową wartość stałej λ . „Dzięki członowi λ wszystko dzieje się tak, jakby energia próżni była różna od zera” — napisał Lemaître³⁶.

Efekt antygravitacyjny stałej kosmologicznej λ pojawia się, ponieważ ciśnienie, którym wypełnia przestrzeń, jest ujemne. Ujemne ciśnienie nie jest niczym szczególnie egzotycznym, często nazywamy je napięciem, jak w rozciągniętej gumce. Ujemne ciśnienie wywołuje „ujemną grawitację” lub antygravitację w teorii Einsteina, a to właśnie przyspiesza ekspansję.

Kiedy przestrzeń się rozszerza, jej właściwości się nie zmieniają. Po prostu dostajemy jej więcej. Tak więc — w przeciwieństwie do normalnej materii lub promieniowania — ciemna energia czasoprzestrzeni nie ulega rozrzedzeniu w trakcie ekspansji i może się nawet stać decydującym czynnikiem w ewolucji wszechświata, gdy przestrzeń się rozrośnie. Inaczej jest w przypadku wszechświatów hipersferycznych, które odpowiadają dolnemu zestawowi krzywych na słynnym wykresie Lemaître'a (zob. fot. 1 na wklejce). W nich przestrzeń ma niską gęstość ciemnej energii. W wyniku tego grawitacja działa w całości przyciągająco i rozmiar wszechświata zmienia się na podobieństwo

trajektorii lotu piłki bejsbolowej: na początku rośnie, osiąga maksimum, zanim antygravitacja ciemnej energii nagromadzi się i zacznie wywierać swój wpływ, a następnie znów się zapada w Wielkim Kolapsie. Ale jeśli wartość stałej kosmologicznej jest większa, może przeciwdziałać przyciąganiu grawitacyjnemu materii i radykalnie zmienić bieg ewolucji kosmologicznej. Ścieżka ekspansji wszechświatów z odpowiednią ilością ciemnej energii przechodzi od lotu piłki bejsbolowej do przyspieszającej rakiety kosmicznej. Tego rodzaju zachowanie Lemaître przedstawił na górnych krzywych swojego wykresu.

Prawdę powiedziawszy, poza myśleniem o właściwościach pustej przestrzeni Lemaître miał też drugi powód, by trzymać λ w zanadrzu, nie mniej interesujący, o którym wspomniałem już w rozdziale 1. Dotyczył w całości możliwości zamieszkania wszechświata. Starannie dopasowując wartość liczbową λ , mógł uzyskać wszechświat z długą epoką bardzo powolnej ekspansji, podczas której mogły powstać galaktyki, gwiazdy i planety. Ten „niezdecydowany” wszechświat jest najbardziej sprzyjający życiu spośród zaproponowanych przez Lemaître’a: odpowiada on jedynej krzywej biegnącej prawie poziomo na fot. 1 na wklejce. (Jednak gdyby Lemaître dalej poprowadził swoje obliczenia, nawet ten wszechświat w końcu zacząłby przyspieszać).

Lemaître i Einstein przez resztę życia prowadzili spór na temat „małej lambdy”. Nigdy nie udało im się dojść do porozumienia w tej kwestii. Dziennikarze tropiący ich podczas spacerów po Ateneum w Caltechu pisali o „małej lamie” podążającej za nimi jak cień. W swojej późniejszej korespondencji z Lemaître’em na ten temat Einstein przyznał, że jeśli „mógłby wykazać, że λ istnieje, byłoby to bardzo ważne odkrycie”³⁷. Tylko tyle zrobił w kwestii ponownego rozważenia niesławnego członu λ . Osiemdziesiąt lat później, w ramach prawdziwie niezwykłego osiągnięcia, bardzo precyzyjne obserwacje astronomiczne widm wybuchających gwiazd zwanych supernowymi dowiodą, że Lemaître miał rację: żyjemy

w „niezdecydowanym” wszechświecie, choć jego okres niezdecydowania zakończył się kilka miliardów lat temu³⁸.

Najbardziej zdumiewający „szczegół” na wykresie Lemaître’a być może kryje się w lewym dolnym rogu, gdzie napisał „ $t = 0$ ”, czyli **z e r o w y m o m e n t c z a s u**.

Otóż pierwotny rozszerzający się wszechświat Lemaître’a z 1927 roku nie miał początku. Zamiast tego Lemaître założył, że wszechświat ewoluował powoli i stopniowo z prawie statycznego stanu w nieskończonej przeszłości. Do 1929 roku zdał sobie jednak sprawę, że taka sytuacja bardzo przypominała szpilkę Einsteina balansującą na główce, więc porzucił ten scenariusz na rzecz prawdziwego początku. Lemaître doszedł do wniosku, że ekspansja oznaczała, iż wszechświat musiał mieć przeszłość, która niewyobrażalnie różniła się od terażniejszości. „Musimy dokonać całkowitej przebudowy naszej kosmogonii” — pisał. „Potrzebujemy wybuchowej teorii kosmicznej ewolucji”³⁹.

Wykraczając daleko poza to, dokąd mogła go nawet doprowadzić teoria Einsteina, zaczął wyobrażać sobie początek wszechświata jako superciężki „pierwotny atom”, którego spektakularny rozpad miałby doprowadzić do powstania ogromnego kosmosu, obserwowanego dzisiaj. „Stojąc na schłodzonym żużlu, widzimy powolne zanikanie słońc i próbujemy przywołać odległy blask początku światów” — napisał w swej monografii *L’Hypothèse de l’atome primitif*. Poszukując śladów gwałtownych narodzin wszechświata, zainteresował się wówczas promieniami kosmicznymi, które uważał za pozostałości pradawnej kuli ognia. Na późniejszym etapie swojej kariery, aby lepiej zrozumieć trajektorie promieni kosmicznych, Lemaître zakupił jedną z pierwszych elektronicznych maszyn liczących, Burroughs E101, którą widział na Światowej Wystawie Expo w 1958 roku w Brukseli, i z pomocą swoich studentów wniósł ją na strych wydziału fizyki w Louvain, zakładając tym samym pierwsze uniwersyteckie centrum obliczeniowe⁴⁰.

Jednak podczas gdy idea rozszerzającego się wszechświata została szeroko

zaakceptowana na początku lat trzydziestych XX wieku, wszelkie mówienie o początku wszechświata spotykało się z wielkim sceptycyzmem. „Pojęcie początku obecnego porządku natury jest dla mnie odrażające” — stwierdził Eddington. „Jako naukowiec po prostu nie wierzę, że wszechświat zaczął się od wybuchu. To tak, jak gdyby coś nieznanego czyniło coś, o czym nie mamy pojęcia”⁴¹.

Einstein również w pierwszej chwili odrzucił ideę początku. Uważał, że, podobnie jak osobliwość wewnątrz doskonale sferycznych czarnych dziur Schwarzschilda, zero czasu w rozszerzających się wszechświatach Lemaître’a jest sztucznym wytworem doskonale symetrycznego i jednolitego sposobu ich rozszerzania. Jego zdaniem, ponieważ rzeczywisty wszechświat nie jest idealnie jednorodny, jego elementy nie spadłyby na siebie, gdybyśmy prześledzili ekspansję wstecz w czasie, zamieniając początek na cykle kurczenia się i rozszerzania, które z filozoficznego punktu widzenia uważał za dużo bardziej zadowalające. Lemaître wspominał ich rozmowę w 1957 roku: „Ponownie spotkałem się z Einsteinem w Kalifornii, przy Ateneum w Pasadenie. Mówiąc o swoich wątpliwościach dotyczących nieuchronności początku w pewnych warunkach, Einstein zaproponował uproszczony model wszechświata niesferycznego, dla którego bez problemu obliczyłem tensor energii i pokazałem, że furka, o której myślał Einstein [aby uniknąć początku], nie działała”⁴². Lemaître najwyraźniej podzielał odczucia Einsteina dotyczące nieuchronności pojawienia się osobliwości, zauważając: „Z estetycznego punktu widzenia jest to niefortunne. Na przemian rozszerzający się i kurczący wszechświat nosi w sobie nieodparty urok poetycki, przypominający legendarnego Feniksa”⁴³.

Jednak wszechświat jest tym, czym jest. Pomimo filozoficznych i estetycznych skłonności swoich pionierów kosmologia relatywistyczna wyraźnie wskazywała na prawdziwy początek i czyni to do dziś.

Tymczasem zero czasu — dzień bez wczoraj Lemaître’a — jest kolejną osobliwością w ogólnej teorii względności, gdzie krzywizna czasoprzestrzeni

staje się nieskończona, a równanie Einsteina nic na jego temat nie mówi. Co ciekawe, Wielki Wybuch to kamień węgielny i jednocześnie pięta achillesowa kosmologii relatywistycznej — stan nieunikniony, ale najwyraźniej wykraczający poza nasze zrozumienie.

To głęboko dezorientujący stan rzeczy. Jeśli czas rozpoczął się w Wielkim Wybuchu, wszystkie pytania o to, co wydarzyło się wcześniej, mogą się wydawać bezsensowne. Nawet spekulacje na temat tego, co spowodowało Wielki Wybuch, będą nie na miejscu, ponieważ przyczyny poprzedzają skutki, co wymaga jakiegoś pojęcia czasu. To pozorne załamanie podstawowej przyczynowości na początku czasu było sednem debaty, w której Eddington i Einstein zmierzyli się z Lemaître’em. Dwaj pierwsi byli tak niechętni rozpatrywaniu początku wszechświata, gdyż wydawało się, że prawdziwy początek wymaga pewnego rodzaju nadprzyrodzonej ingerencji w naturalny bieg ewolucji. Ta powściągliwość stała się tym bardziej problematyczna, że w ciągu stulecia pojawiało się coraz więcej dowodów na to, że wszechświat powstał w sposób zaskakująco sprzyjający ewolucji życia. Z perspektywy czasu można wybaczyć Eddingtonowi i Einsteinowi ich podejrzliwość!

Spojrzenie Einsteina i Eddingtona na początek wszechświata było przesiąknięte dawnym determinizmem sięgającym czasów Newtona, do którego odwołuje się klasyczna ogólna teoria względności Einsteina. W ramach tego schematu każdy początek wymaga warunków początkowych o takim samym stopniu dostrojenia jak ewoluujący z nich wszechświat. Wszechświat, który ewoluuje, by stać się złożonym w późniejszej fazie, na wczesnym etapie wymaga warunków początkowych o tym samym poziomie złożoności. Wszechświat sprawiający wrażenie specjalnie zaprojektowanego do narodzin życia wymaga warunków początkowych, które od początku zawierają ten sam poziom sprzyjania życiu. Zupełnie jakby „działanie siły wyższej” było zaangażowane we wprowadzenie naszego precyzyjnie dostrojonego, biofilnego wszechświata w ruch.

Ale Lemaître już wówczas wykroczył daleko poza determinizm. Zaproponował zerwanie deterministycznego łańcucha przyczyn i skutków poprzez przyjęcie kwantowej perspektywy w rozważaniach dotyczących pochodzenia wszechświata i wyjaśnił to stanowisko w swym prawdopodobnie najbardziej wizjonerskim liście, *Początek świata z punktu widzenia teorii kwantowej*, opublikowanym w czasopiśmie „Nature” w maju 1931 roku⁴⁴. Kosmopoetycki list Lemaître’a jest jednym z najodważniejszych tekstów naukowych XX wieku. Liczy zaledwie 457 słów, ale może być uważany za akt założycielski kosmologii Wielkiego Wybuchu. W tym liście wskazuje, o ile mi wiadomo, po raz pierwszy, że rewolucje teorii względności i teorii kwantowej są ze sobą ściśle związane, że początek wszechświata powinien stanowić część nauki rządzącej się prawami fizycznymi, które możemy odkryć, ale że te hipotetyczne prawa będą musiały obejmować połączenie teorii kwantowej z grawitacją. Lemaître przekonywał, że musimy scalić ze sobą teorię kwantową i teorię względności, ponieważ ta druga prowadzi do Wielkiego Wybuchu, w którym ta pierwsza staje się istotna. I przewidywał, że ta unifikacja może zapewnić tak potężną i głęboką syntezę, że wprowadzi początek wszechświata do sfery nauk przyrodniczych. Te myśli okazały się prorocze; dzisiejsi fizycy lubią mówić, że Wielki Wybuch był największym eksperymentem kwantowym.

Teoria kwantów napełnia fizykę nieuniknionym elementem nieokreśloności i „rozmycia”. Lemaître spekulował, że w ekstremalnych warunkach najwcześniejszych momentów wszechświata nawet przestrzeń i czas stały się rozmyte i nieoznaczone. „Pojęcia przestrzeni i czasu na początku nie miały absolutnie żadnego znaczenia” — napisał w swoim manifeście dotyczącym Wielkiego Wybuchu. „Natomiast przestrzeń i czas nabierają sensownego znaczenia dopiero wtedy, gdy pierwotny «kwant» uległ podziałowi na odpowiednią liczbę kwantów”. I dodał enigmatycznie: „Jeśli ta sugestia jest słuszna, początek świata miał miejsce nieco przed początkiem przestrzeni i czasu”.

Ale jak kwantowy indeterminizm mógłby rozwiązać zagadkę przyczynowości, jaką stanowi Wielki Wybuch? Lemaître miał na myśli to, że losowe przeskoki kwantowe mogłyby wytworzyć złożony wszechświat z prostego pierwotnego atomu. I jeśli złożoność dzisiejszego wszechświata była wynikiem niezliczonych zamrożonych przypadków w jego embrionalnej ewolucji, a nie konieczną konsekwencją idealnie zaprojektowanych warunków początkowych u jego zarania, to czy nie ułatwiłoby to zaakceptowania całej idei początku? Rozważając konsekwencje pochodzenia kwantowego, Lemaître zakończył swój list następująco: „Oczywiście początkowy kwant nie mógł skrywać w sobie całego przebiegu ewolucji. Historia świata nie musiała być zapisana w pierwszym kwancie niczym piosenka na płycie fonografu [...] Zamiast tego od samego początku mogły ewoluować zupełnie różne wszechświaty”.

W rzeczywistości, ponieważ idea kwantowego początku zdawała się usuwać problem pochodzenia czasu, Lemaître zaczął postrzegać tę koncepcję jako centralny filar swojej nowej kosmologii, mimo że nigdy nie napisał choćby jednego równania opisującego pierwotny atom, które mogło uzasadnić jego wizję. Intuicyjny obraz początku, rozważany przez Lemaître’a w manifeście Wielkiego Wybuchu, emanuje niezwykłą prostotą. W jego rozumowaniu pierwotny atom przypominał abstrakcyjne, jednorodne, nieskazitelne kosmiczne jajo. To przywodzi mi na myśl dzieło *Początek świata* rumuńskiego rzeźbiarza Constantina Brâncușiego (zob. fot. 6 na wklejce).

Brytyjski fizyk kwantowy Paul Dirac, wczesny zwolennik hipotezy pierwotnego atomu Lemaître’a, poszedł jeszcze dalej i spekulował, że przeskoki kwantowe we wczesnym wszechświecie mogą całkowicie zastąpić potrzebę warunków początkowych. Czy to możliwe, że przyczynowość w pewnym sensie zanika w kwantowym początku, że tajemnica „pierwszej przyczyny” ulatnia się w świecie kwantowym — naszym świecie?

Paul Dirac przybył do Cambridge jako student razem z Lemaître’em

w 1923 roku i też miał nadzieję studiować teorię względności u Eddingtona. Ale trafił na inną ścieżkę, która zawiodła go ku kwantowej teorii cząstek, w której to dziedzinie badań zdobył niezrównaną głębię zrozumienia. Dirac odkrył równanie nazwane jego imieniem, które połączyło szczególną teorię względności Einsteina z teorią kwantową i przepowiedziało istnienie antymaterii, co przyniosło mu Nagrodę Nobla w 1933 roku. Później został piętnastym profesorem katedry matematyki Lucasa w Cambridge. Dirac był intrygującą postacią, nieśmiałą i cichą — według niektórych kolegów prawie niewidoczną. Pewnego razu pod koniec lat siedemdziesiątych Stephen i jego żona Jane zaprosili Diraców w niedzielne popołudnie na herbatkę do swojego domu. Don Page, ówczesny asystent Stephena, który mieszkał z Hawkingami, by pomagać w codziennej opiece nad swym szefem, postanowił zostać, żeby przysłuchiwać się rozmowie między dwoma gigantami fizyki XX wieku. Tymczasem żaden z nich nie wypowiedział na tym spotkaniu ani słowa.

W archiwum Diraca w Tallahassee na Florydzie znajduje się piękny szkic postaci Lemaître'a, wykonany ołówkiem przez jednego ze słuchaczy podczas jego wykładu w Klubie Kapicy w Cambridge w 1930 roku, opatrzony podpisem: „Ale ja nie wierzę w palec Boży mieszający eter” (zob. il. 15). Zgodnie z dotyczącą tego wydarzenia notatką Diraca zamieszczoną w jego wspomnieniach, które spisał w 1978 roku, „podczas wykładu Lemaître'a toczyło się wiele dyskusji na temat roli nieokreśloności kwantowej”. Dirac i Lemaître widzieli w mechanice kwantowej sposób na rozplątanie przyczynowego węzła zaplecionego przez deterministyczny obraz początku, wywodząc korzenie znacznej części dzisiejszej złożoności wszechświata od przypadkowych przeskoków kwantowych następujących tuż po jego narodzinach. Te przeskoki w pewnym sensie przekształciły ewolucję kosmologiczną w prawdziwie twórczy proces.



II. 15. Ten rysunek Georges'a Lemaître'a został wykonany przez uczestnika wykładu wygłoszonego w 1930 roku na Uniwersytecie w Cambridge.

W podpisie czytamy, że Lemaître nie widział powodu ku temu, aby Bóg ingerował w Wielki Wybuch. Duchowny traktował hipotezę pierwotnego atomu jako czysto naukową kwestię osadzoną w teorii fizycznej, której poprawność ostatecznie zweryfikują obserwacje astronomiczne. Czterdzieści lat później Paul Dirac do ilustracji dodał notatkę (poniżej).

Around 1930 the Abbé Lemaître visited Cambridge and gave a lecture at the Kapitza Club. There was much discussion about the indeterminacy of quantum mechanics. Lemaître emphasized his opinion that he did not believe God influenced directly the course of atomic events.

A member of the audience made this drawing to commemorate this discussion. I do not remember who the artist was. It is quite a good likeness of Lemaître.

P A M Dirac

1st Sept 1971

Dokonując bilansu po oszałamiającej dekadzie odkryć, Dirac ponownie odniósł się do hipotezy pierwotnego atomu Lemaître'a w 1939 roku w swoim wykładzie w Królewskim Towarzystwie Edynburskim z okazji otrzymania Nagrody Scotta: „Nowa [uwzględniająca ekspansję] kosmologia prawdopodobnie okaże się filozoficznie jeszcze bardziej rewolucyjna niż teoria względności czy teoria kwantów, chociaż obecnie trudno zdać sobie sprawę z wszystkich jej konsekwencji”⁴⁵. Siedemdziesiąt lat później — uwolniona od kilku uprzedzeń — moja podróż ze Stephenem wydobyła na powierzchnię niektóre z tych prawdziwie filozoficznych konsekwencji.

W tamtych czasach obserwacje, które mogłyby potwierdzić hipotezę pierwotnego atomu lub czegoś podobnego, pozostawały jeszcze długo nieuchwytnie. Po okresie swej świetności we wczesnych latach trzydziestych kosmologia faktycznie stała się niejako naukowym zaściankiem charakteryzującym się brakiem danych i górnolotnymi spekulacjami, a kosmolodzy zyskali wątpliwą reputację „tych, którzy często się mylą, lecz nigdy nie wątpią”.

Skutkiem tego w owym czasie teoria Wielkiego Wybuchu niemal zniknęła z widoku publicznego. Głośny antagonistą teorii Lemaître’a, brytyjski astrofizyk Fred Hoyle, ukuł określenie *big bang*, „Wielki Wybuch”, używając tego szyderczego terminu podczas wywiadu radiowego BBC w 1949 roku, określając go jako „irracjonalny proces, którego nie można opisać w terminach naukowych”. Hoyle nie przegapił żadnej okazji, by przedstawić kosmologię Wielkiego Wybuchu jako pseudonaukę uprawianą w ramach konkordystycznej krucjaty. W ślad za Eddingtonem Hoyle stwierdził: „Nie można znaleźć żadnego wyjaśnienia przyczynowego, a nawet jakiegokolwiek innego wyjaśnienia początku wszechświata. Namiętne szaleństwo, z jakim kosmologia Wielkiego Wybuchu przyłgnęła do zbiorowego przedsięwzięcia naukowego, ewidentnie wynika z głęboko zakorzenionego przywiązania do pierwszych wersów Księgi Rodzaju, stanowiącego fundamentalizm religijny w jego najczystszej postaci”⁴⁶, i zalecał, aby „za każdym razem, gdy ktoś używa słowa «początek», nie wierzyć w nic, co nam mówi!”⁴⁷.

Współpracując z Hermannem Bondim i Thomasem Goldem, Hoyle zaproponował konkurencyjny model wszechświata, teorię stanu stacjonarnego, która stała się poważnym rywalem Wielkiego Wybuchu w latach pięćdziesiątych. Teoria stanu stacjonarnego głosiła, że chociaż wszechświat od zawsze się rozszerza, utrzymuje stałą średnią gęstość, ponieważ materia jest nieustannie tworzona, dzięki czemu powstają nowe galaktyki, które wypełniają wyłaniające się przestrzenie w miarę oddalania się od siebie starszych galaktyk. Podczas gdy w kosmologii Wielkiego Wybuchu większość

materii powstaje w jednej chwili początkowej, we wszechświecie stanu stacjonarnego tworzenie materii jest procesem powolnym i wiecznym. Wszechświat w stanie stacjonarnym Hoyle'a nie ma początku ani końca w czasie, co przypomina nieco uboższą wersję multiświata ze stałą produkcją nowych galaktyk, a nie wszechświatów.

Tymczasem niezwykle rosyjski fizyk George Gamow — dla przyjaciół Gee-Gee (czyt. Dżidzi) — poddał egzotyczne środowisko gorącego Wielkiego Wybuchu dokładniejszym badaniom. Gamow był postacią barwną i najwyraźniej miał dar przyciągania do siebie ludzi ze wszystkich sfer życia, od Trockiego i Bucharina po Einsteina i Francisa Cricka — często w pamiętnych okolicznościach⁴⁸. Gamow dorastał w Odessie i studiował w Petersburgu, gdzie uczył się ogólnej teorii względności u Aleksandra Friedmanna. Przerażony rosnącym zakresem ingerencji państwa komunistycznego w życie intelektualne Gamow wraz z żoną chciał uciec ze Związku Sowieckiego, próbując przedostać się łodzią wiosłową z południowego krańca Półwyspu Krymskiego przez Morze Czarne do wybrzeża Turcji. Wszystko szło dobrze, ale po dwóch dniach ich morskiej podróży nadszedł sztorm i wylądowali z powrotem na Krymie. Mimo to Gamowowie się nie poddali. W 1933 roku, kiedy Bohr zaprosił Gamowa na Siódmy Kongres Solvaya do Brukseli, skorzystali z okazji i wyemigrowali do Stanów Zjednoczonych.

Gamow nie był ani matematykiem, ani astronomem, lecz fizykiem jądrowym, który wyobraził sobie cały wszechświat podczas pierwszych kilku minut ekspansji jako gigantyczny reaktor jądrowy. Pracując z Ralphem Alpherem i Robertem Hermanem, Gamow przewidywał, że Wielki Wybuch będzie gorący, bardzo gorący, i zastanawiał się, czy pierwiastki chemiczne, z których jesteśmy zbudowani my i wszystko wokół nas, były kiedyś wytopione w tym pradawnym piecu kosmicznym. Doszedł do wniosku, że kiedy temperatura pierwotnego wszechświata była tak wysoka, że nie mogły nawet powstać jądra atomowe, układ okresowy był początkowo pusty,

z wyjątkiem pierwszego pierwiastka, wodoru, który jest tylko pojedynczym protonem. Cały wszechświat był wypełniony supergęstą gorącą plazmą, którą Gamow nazwał ylemem, od greckiego słowa ύλη oznaczającego „materię”. Ta plazma składała się ze swobodnie poruszających się atomowych cegiełek — elektronów, protonów i neutronów — zanurzonych w gorącej kąpieli promieniowania. Ale kiedy wszechświat rozszerzył się i ochłodził, neutrony i protony połączyły się, tworząc złożone jądra atomowe. Pierwszy w kolejności w tym procesie powstaje deuter, ciężki wodór zbudowany z jednego protonu i jednego neutronu, który z kolei wiąże się z następnym protonem i neutronem, tworząc hel. Łącząc prawa fizyki jądrowej z rozszerzaniem się kosmosu, Gamow i jego zespół obliczyli, że dogodny moment na syntezę jądrową w pierwotnym wszechświecie pojawił się około stu sekund po Wielkim Wybuchu i trwał kilka minut do momentu, gdy w wyniku ekspansji temperatura spadła poniżej stu milionów stopni, na tyle nisko, że kosmiczny reaktor jądrowy przestał działać. Odkryli, że ten krótki przedział czasu wystarczyłby do przekształcenia mniej więcej jednej czwartej wszystkich protonów we wszechświecie w jądra helu, wraz ze śladową ilością kilku cięższych pierwiastków, takich jak beryl i lit. To względne rozpowszechnienie lekkich pierwiastków przewidywane przez Gamowa i jego zespół doskonale zgadza się z pomiarami astronomicznymi. Dziś te odkrycia traktowane są jako jeden z kluczowych testów teorii gorącego Wielkiego Wybuchu⁴⁹.



II. 16. George Gamow napisał na etykiecie tej butelki Cointreau słowo YLEM, aby upamiętnić swoją pracę z Ralphem Alpherem w 1948 roku nad syntezą jąder atomowych w gorącym Wielkim Wybuchu. Termin „ylem” jest słowem pochodzącym z języka średnioangielskiego, które odnosi się do pierwotnej substancji, z której rzekomo powstała cała materia.

W pracach Gamowa kryło się również bardziej doniosłe przewidywanie, które czekało na możliwość weryfikacji. Alpher, Gamow i Herman zdali sobie sprawę, że ciepło uwolnione podczas syntezy jąder atomowych powinno nadal istnieć do dnia dzisiejszego w postaci morza promieniowania resztkowego wypełniającego całą przestrzeń. Przecież nie mogło nigdzie zniknąć. Wszechświat jest wszystkim, co istnieje. Ich obliczenia wykazały, że miliardy lat kosmicznej ekspansji schłodziłyby to promieniowanie cieplne do temperatury około 5 kelwinów, czyli -267 stopni Celsjusza. Takie zimne promieniowanie sprawiłoby, że wszechświat świeciłby głównie w zakresie mikrofalowych częstotliwości widma elektromagnetycznego. Tak więc dzisiejszy wszechświat — cała przestrzeń — powinien być wypełniony mikrofalami. Było to epokowe odkrycie: Gamow i jego współpracownicy zidentyfikowali relikty pochodzący z epoki gorącego Wielkiego Wybuchu,

który ponadto powinniśmy móc zobaczyć, jeśli tylko zajrzemy w głąb wszechświata instrumentami rejestrującymi mikrofałe.

I istotnie możemy to zrobić. Gorące ciała promieniują i okazuje się, że wszechświat nie jest tu wyjątkiem. To reliktowe kosmiczne mikrofalowe promieniowanie tła (CMB) zostało odkryte w 1964 roku w wyniku pewnego zbiegu okoliczności przez dwóch amerykańskich fizyków, Arno Penziasa i Roberta Wilsona. Nieświadomi pracy Gamowa, Penzias i Wilson kalibrowali gigantyczną mikrofalową antenę tubową w laboratoriach Bell Telephone w Holmdel w stanie New Jersey, która początkowo została skonstruowana do śledzenia balonów satelitarnych w ramach Programu Echo, kiedy odkryli nieustanny szum pochodzący z anteny, którego pochodzenia nie potrafili wyjaśnić. Bez względu na to, w które miejsce na niebie skierowali swoje urządzenie, napotykali dokładnie ten sam szum o długości fali 7,35 centymetra w dzień i w nocy. Dzięki rozmowom z kolegami kosmologami szybko zdali sobie sprawę, że ich antena miała prawo szumieć: odbierała słabe, reliktowe promieniowanie gorącego Wielkiego Wybuchu — telegram wysłany na początku czasu przewidziany przez Lemaître'a i opisany przez Gamowa.

Odkrycie reliktwego promieniowania mikrofalowego przez Penziasa i Wilsona było „wstrząsem, który przetoczył się przez cały świat”. W końcu do społeczności naukowej dotarło, że ekspansja kosmologiczna wywołuje realne długofalowe efekty i oznacza, że daleka przeszłość jest niewyobrażalnie różna od terażniejszości. Ten wniosek całkowicie zmienił debatę na temat pochodzenia wszechświata. Niemal z dnia na dzień ostateczna przyczyna ekspansji, owa zagadka, która trzydzieści lat wcześniej doprowadziła do sporu Einsteina z Lemaître'em, zyskała status kluczowego zagadnienia kosmologii teoretycznej i od tamtej pory pozostała w niej obecna.

Informacja o odkryciu mikrofalowego promieniowania tła dotarła do Lemaître'a 17 czerwca 1966 roku, zaledwie trzy dni przed śmiercią. Bliski przyjaciel przyniósł mu do szpitala wiadomość, że w końcu odnaleziono relik

dowodzący słuszności jego teorii. *Je suis content [...] maintenant on a la preuve*⁵⁰ — podobno odpowiedział.

Może się wydawać dziwne że „ojciec Wielkiego Wybuchu” był też katolickim księdzem. Ale Lemaître rozumiał, jak balansować między Einsteinem a papieżem, i zadał sobie trud, by wyjaśnić, dlaczego nie widzi konfliktu między „dwoma drogami do prawdy”, nauką i zbawieniem, którymi postanowił podążać. W wywiadzie z Duncanem Aikmanem dla „New York Timesa”, parafrazując słowa Galileusza o nauce i religii⁵¹, Lemaître oznajmił: „Kiedy zdasz sobie sprawę, że Biblia nie jest podręcznikiem naukowym, a teoria względności nie ma znaczenia dla zbawienia, dawny konflikt między nauką a religią znika”. I dodał: „Mam zbyt wielki szacunek dla Boga, aby sprowadzać Go do naukowej hipotezy”⁵² (zob. fot. 5 na wklejce). Z jego pism jasno wynika, że Lemaître nie widział powodu do ingerencji Boga w Wielki Wybuch i nie doświadczał żadnego konfliktu między tymi dwoma sferami. Można nawet zauważyć u niego pewną radość z tego powodu. „Okazuje się, że drobiazgowo szukanie prawdy wymaga poszukiwania zarówno duszy, jak i widm kosmicznych” — powiedział kiedyś.

Na początku lat sześćdziesiątych Lemaître — już jako prałat i prezes Papieskiej Akademii Nauk — dążył do realizacji celów Akademii polegających na rozwijaniu nauki na doskonałym poziomie przy jednoczesnym utrzymaniu zdrowych relacji z Kościołem, poprzez skrupulatne poszanowanie różnic w metodologii i języku między nauką a religią. Daleki od konkordystycznych interpretacji mających na celu pogodzenie prawd wiary z odkryciami naukowymi, Lemaître podkreślał, że nauka i religia mają własne pola zainteresowań. W związku z tym o hipotezie pierwotnego atomu powiedział: „Taka teoria pozostaje całkowicie poza wszelkimi kwestiami metafizycznymi czy religijnymi. Pozostawia materialistom swobodę zaprzeczania wszelkiemu transcendentalnemu Bytowi [...]. Dla wierzących usuwa wszelkie próby [osiągnięcia] zażyłości z Bogiem. Jest to zgodne ze

słowami Izajasza mówiącego o «Bogu ukrytym» już na początku stworzenia”⁵³.

Na bardziej formalne stanowisko Lemaître’a w tych sprawach bez wątpienia wpłynęły jego studia w neotomistycznej szkole filozofii kardynała Merciera w Louvain, która uwzględniała nowoczesną naukę, ale odmawiała jej większego znaczenia ontologicznego. W instytucie Merciera Lemaître nauczył się rozróżniać dwa poziomy istnienia, rozciągające się między początkiem świata fizycznego w sensie czasowym i metafizycznymi pytaniami o istnienie: „Możemy traktować to wydarzenie [rozpad pierwotnego atomu] jako początek. Nie mówię tu o kreacji. Fizycznie wszystko dzieje się tak, jakby był to naprawdę początek, w tym sensie, że jeśli coś wydarzyło się wcześniej, nie ma to zauważalnego wpływu na zachowanie naszego wszechświata. [...] Każda preegzystencja naszego wszechświata ma charakter metafizyczny”⁵⁴.

To rozróżnienie umożliwiło księdzu — i w zasadzie pozwoliło uznać za oczywistość — traktowanie badań nad fizycznym pochodzeniem wszechświata jako szansy dla nauk przyrodniczych, podczas gdy Einstein traktował to jako zagrożenie dla teorii fizycznej. U podstaw ich naukowego sporu leży zatem odmienne stanowisko filozoficzne. Najwyraźniej mieli różne koncepcje na temat tego, czego ostatecznie nauka próbuje się dowiedzieć o świecie. Wydaje się, że Lemaître doskonale zdawał sobie sprawę, że nasza zdolność do uprawiania nauki — bez względu na stopień abstrakcji — pozostaje zakorzeniona w naszej relacji z wszechświatem. Jego podwójne powołanie zainspirowało go ponadto do starannego wytyczenia granic zarówno sfery naukowej, jak i duchowej. Rezultatem była wiara pozbawiona dogmatów i nauka zakorzeniona w naszej ludzkiej kondycji. Podczas uroczystości upamiętniającej go w rodzinnej wiosce jedna z siostrzenic Lemaître’a powiedziała mi, że na rodzinnych spotkaniach jej kuzyni często próbowali rzucić wyzwanie Georges’owi, pytając, skąd pochodzi jego pierwotny atom. „Ach, to jest Bóg” — mówił im żartobliwie.

Natomiast Einstein był idealistą. Jego odkrycie ogólnej teorii względności stanowiło niezrównane osiągnięcie. Umocniło go w przekonaniu, że gdzieś istnieje ostateczna teoria odwiecznych prawd matematycznych, czekająca na odkrycie, która mówi nam, jak powinien wyglądać wszechświat. Odzwierciedla to przyczynowa i deterministyczna postawa Einsteina we wszystkich kwestiach związanych z początkiem wszechświata. Jednak oszałamiające przewidywanie jego własnej teorii względności, że wszechświat powstał w Wielkim Wybuchu, który jest również początkiem czasu, poważnie zakwestionowało to stanowisko.

W następnych rozdziałach postaram się wykazać, że pogląd Lemaître'a ostatecznie okazał się bardziej godnym zaufania przewodnikiem w rozwiązaniu zagadki projektu. Tym samym spór Einsteina z Lemaître'em odzwierciedla dystans, jaki Hawking pokonał siedemdziesiąt lat później. Wczesny Hawking trwał na stanowisku Einsteina — przy idei, że odkrywamy obiektywne prawdy w fizyce, które w jakiś sposób wykraczają poza fizyczny wszechświat. Historia naszej podróży na głębszym filozoficznym poziomie opowiada o tym, jak i dlaczego Stephen zerwał ze stanowiskiem Einsteina i przyjął podejście Lemaître'a, i co to wniesie nie tylko do naszej koncepcji Wielkiego Wybuchu, ale także do przyszłego programu kosmologicznego.



II. 17. Kiedy rozpoczęliśmy naszą współpracę, Stephen nie wiedział o pionierskiej pracy Lemaître'a nad kosmologią kwantową. Zabrałem go więc na wycieczkę do byłego gabinetu Lemaître'a w Kolegium Norbertanów w Louvain, gdzie pokazałem mu manifest Wielkiego Wybuchu Lemaître'a z 1931 roku.

¹ Georges Lemaître, *Rencontres avec Einstein*, w: *Revue des Questions scientifiques* (Bruxelles: Société Scientifique de Bruxelles, 20 stycznia 1958), s. 129.

² Georges Lemaître, *Univers et Atome*, jego ostatni publiczny wykład wygłoszony w 1963 roku dla byłych studentów Louvain. To sformułowanie jest nieco mocniejsze niż sposób, w jaki zwykle opisywał swoje stanowisko, co bez wątpienia odzwierciedla pewną frustrację postawą jego przeciwników. Dogłębny opis (do pewnego stopnia ewoluujących) poglądów Lemaître'a na relację między nauką a religią, w tym analizę tego wykładu, przedstawia Dominique Lambert w *L'itinéraire spirituel de Georges Lemaître* (Bruxelles: Lessius 2007).

³ Thomson został nobilitowany w 1892 roku jako pierwszy baron Kelvin z Largs. Tytuł odnosi się do rzeki Kelvin, która płynie w pobliżu jego laboratorium na Uniwersytecie

w Glasgow. Dziś lorda Kelvina znamy przede wszystkim dlatego, że na jego cześć nadano nazwę absolutnej skali temperatury. Kelvin ustalił, że wartość temperatury zera absolutnego wynosi około $-273,15$ stopnia Celsjusza. W ramach imponującego przedsięwzięcia ułożył także pierwszy transatlantycki kabel telegraficzny między Irlandią a Nową Fundlandią. Tutaj Kelvin jest cytowany w: Lord Kelvin, *Nineteenth Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light*, „Philosophical Magazine” 6, nr 2 (1901), s. 1–40.

⁴ Aluzja do limeryku Arthura Bullera: *There was a young lady named Bright, / Whose speed was far faster than light; / She started one day In a relative way, / And returned on the previous night.* W przekładzie Stanisława Barańczaka: „Pani N. to taki prędko typ, że / gdy ją zew płci dziś wieczorem przyprze, / wróci, jak u Einsteina, / wczoraj rano; zwyczajna / rzecz, gdy tempo od światła jest szybsze” (przyp. tłum.).

⁵ Hermann Minkowski, *Raum und Zeit* (wykład, 80. Walne Zgromadzenie Towarzystwa Przyrodników i Lekarzy, Kolonia, wrzesień 1908).

⁶ Cyt. w Abraham Pais, „*Subtle Is the Lord*”: *The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 1982).

⁷ Język zakrzywionej geometrii, którego używał Einstein, został opracowany w XIX wieku przez matematyków, między innymi Carla Friedricha Gaussa i Bernharda Riemanna, którzy zdali sobie sprawę, że zwykłe zasady geometrii poznawane przez nas w szkole, takie jak słynne twierdzenie Pitagorasa lub obserwacja, że kąty trójkąta sumują się do 180 stopni, nie pasują do zakrzywionych powierzchni. Na przykład na pomarańczy (lub na powierzchni Ziemi) suma kątów trójkąta wynosi ponad 180 stopni. Przed Gausssem i Riemannem zakrzywione powierzchnie zawsze traktowano jako zanurzone w normalnej trójwymiarowej przestrzeni euklidesowej. Ale Gauss wykazał, że właściwości geometryczne dwuwymiarowych zakrzywionych powierzchni, takie jak pojęcia linii prostych i kątów można zdefiniować samoistnie, bez odwoływania się do czegokolwiek poza nimi. To uutorowało Riemannowi drogę do wyobrażenia sobie, że w podobny sposób trójwymiarowa przestrzeń również może być zakrzywiona i różnić się od przestrzeni euklidesowej. Einstein wyobraził sobie dokładnie to samo i poszedł o krok dalej, opisując świat fizyczny za pomocą czterowymiarowej zakrzywionej geometrii czasoprzestrzeni. Zakrzywiona czasoprzestrzeń podlega zasadom geometrii nieeuklidesowej w czterech wymiarach, bez konieczności odwoływania się do czegokolwiek poza nią. Z fizycznego punktu widzenia oznacza to m.in., że wszechświat nie musi istnieć ani rozszerzać się w jakimś większym pojemniku.

⁸ John Archibald Wheeler, Kenneth Ford, *Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics* (London: Norton 1998), s. 235.

⁹ Pais, „*Subtle is the Lord*”, op. cit.

¹⁰ Specjalna depesza do gazety „New York Times”, 10 listopada 1919.

¹¹ To nie pierwszy raz, kiedy promień ten pojawił się w fizyce. Już w XVIII wieku, stosując mechanikę Newtonowską, John Michell i Pierre-Simon Laplace odkryli, że kulista masa M ściśnięta do tego promienia miałaby prędkość ucieczki równą prędkości światła. Takie

hipotetyczne obiekty nie byłyby w stanie wypromieniować cząstek światła i można je traktować jako prekursory czarnych dziur.

¹² Zob. np. Georges Lemaître, *L'universe en expansion*, „Annales de la Société Scientifique de Bruxelles” A53 (1933), s. 51–85. Dostępne w tłumaczeniu na język angielski jako *The expanding universe*, „General Relativity and Gravitation” 29, nr 55 (1997), s. 641–680.

¹³ Przez większość swojego życia normalna gwiazda będzie się opierać działaniu własnej grawitacji dzięki ciśnieniu termicznemu wytwarzanemu przez syntezę jądrową przekształcającą wodór w hel. W końcu jednak gwiazda wyczerpie swoje paliwo jądrowe i zacznie się kurczyć. Jeśli gwiazda nie jest początkowo zbyt masywna, ciśnienie pochodzące z odpychania między elektronami (lub między neutronami i protonami) w końcu zatrzyma zapadanie, a gwiazda przyjmie postać białego karła (lub gwiazdy neutronowej). Jednak indyjsko-amerykański astrofizyk Subrahmanyan Chandrasekhar otrzymał Nagrodę Nobla za udowodnienie w 1930 roku, że białe karły i gwiazdy neutronowe mają maksymalną masę. Nie ma znanego stanu materii mogącego powstrzymać grawitacyjne zapadanie się masywniejszych gwiazd, które, jak się uważa, kurczą się do pojedynczego punktu o nieskończonej gęstości, tworząc czarną dziurę.

¹⁴ Roger Penrose, *Gravitational Collapse: The Role of General Relativity*, „La Rivista Del Nuovo Cimento” 1 (1969), s. 252–276.

¹⁵ Roger Penrose, *Gravitational Collapse and Space-time Singularities*, „Physical Review Letters” 14, nr 3 (1965), s. 57–59.

¹⁶ **Równanie Einsteina** zawiera liczbę, $8\pi G/c^4$, mnożącą masę i energię materii po prawej stronie. Wartość liczbowa tej wielkości jest niezwykle mała, co oznacza, że do niewielkiego odkształcenia pola czasoprzestrzeni znajdującego się po lewej stronie równania potrzeba ogromnej ilości masy lub energii. Dla porównania, masa całej Ziemi odkształca przestrzeń w swym sąsiedztwie — w porównaniu z normalną przestrzenią euklidesową — o około 10^{-9} .

¹⁷ Albert Einstein, List do Willema de Sittera, 12 marca 1917, w: *Collected Papers*, tom 8, red. Albert Einstein, Martin J. Klein, John J. Stachel (Princeton University Press, 1998), dok. 311.

¹⁸ W celu zapoznania się z bardziej szczegółowym opisem historii odkrycia ekspansji polecam pozycję: Harry Nussbaumer, Lydia Bieri, *Discovering the Expanding Universe* (Cambridge: Cambridge University Press, 2009).

¹⁹ Gorąco polecam biografię Georges’a Lemaître’a, *Atom of the Universe* Dominique’a Lamberta (Kraków: Copernicus Center Press, 2015).

²⁰ Lemaître cytuje tutaj św. Tomasza z Akwinu, który powiedział: „Nie ma niczego w intelekcie, czego pierwaj nie byłoby w zmysłach”.

²¹ Georges Lemaître, *L’Etrangeté de l’Univers* wykład, który wygłosił dla Circolo di Roma w 1960 roku, przedrukowany w „Pontificiae Academiae Scientiarum Scripta Varia” 36 (1972), s. 239.

²² Cefeidy to pulsujące gwiazdy, których jasność rośnie i maleje w okresach od kilku miesięcy do zaledwie jednego dnia. Henrietta Leavitt, jedna z pierwszych kobiet-astronomów ery nowożytnej, wcześniej dostrzegła interesujący związek między okresem pulsacji cefeid a ich jasnością: cefeidy, które były ciemniejsze, miały krótsze okresy pulsacji. Oznaczało to, że można było wykorzystać obserwacje okresowych zmian jasności cefeid do pomiaru odległości w kosmologii. I tak cefeidy stały się pierwszym wiarygodnym prętem pomiarowym astronomów do odległych obiektów we wszechświecie, wykorzystywanym przez Hubble’a z wielką pomysłowością do szacowania odległości do mgławic.

²³ Obserwatorium Lowell’a zostało założone w 1894 roku przez Percivala Lowell’a w celu badania tajemniczych „kanałów” na Marsie. W 1930 roku odkryto tam Plutona.

²⁴ Widmo światła to sposób, w jaki rozkłada się ono na różne barwy. Przesunięcie widma światła pochodzącego z obiektu astronomicznego można ustalić, porównując długość fali możliwej do zidentyfikowania cechy w widmie z długością fali tej samej cechy charakterystycznej mierzonej w laboratorium na Ziemi.

²⁵ Vesto M. Slipher, *Nebulae*, „Proceedings of the American Philosophical Society”, 56 (1917), s. 403–409.

²⁶ Jego artykuł został napisany po francusku i opublikowany w dość mało znanym czasopiśmie „Annales de la Société Scientifique de Bruxelles” (Série A, 47 (1927), s. 49–59). Jego tytuł, *Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques* („Jednorodny wszechświat o stałej masie i rosnącym promieniu uwzględniający prędkości radialne mgławic pozagalaktycznych”), nie pozostawia żadnych wątpliwości w kwestii intencji Lemaître’a. W istocie Lemaître nieco go zmodyfikował podczas ostatecznej redakcji rękopisu, zmieniając słowo „variant” na „croissant”, prawdopodobnie po to, by wzmocnić związek między swym modelem a obserwacjami astronomicznymi sugerującymi, że galaktyki oddalają się od nas.

²⁷ Lambert, *Atom of the Universe*, op. cit.

²⁸ Ze względu na dużą niepewność dotyczącą tych odległości Lemaître podzielił średnią wartość prędkości przez średnią wartość odległości w próbce galaktyk, dla której Hubble opublikował szacunki odległości. Wartość średnia pomogła uśrednić dużą niepewność dla każdego osobnego pomiaru odległości.

²⁹ Chcąc kontynuować dyskusję z Einsteinem, Lemaître wsiadł do taksówki mającej zawieźć Einsteina do laboratorium Auguste’a Piccarda, jego byłego studenta w Berlinie. Podczas przejażdżki Lemaître poruszył temat obserwowanej ucieczki mgławic i tego, że dostarcza to dowodów na rozszerzanie się wszechświata. Wsiadł jednak — według własnych wspomnień — z wrażeniem, że Einstein nie był ani świadomy, ani zainteresowany najnowszymi obserwacjami astronomicznymi.

³⁰ Zakres wiedzy Friedmanna rozciągał się od czysto matematycznych prac nad teorią względności po spektakularne loty balonem na dużych wysokościach w celu zbadania

wpływu wysokości na ludzkie ciało. W 1925 roku stał się posiadaczem światowego rekordu wysokości lotu balonem, wznosząc się na 7400 metrów, wyżej niż najwyższa góra w Rosji. Zmarł kilka miesięcy później, najprawdopodobniej na tyfus, mając trzydzieści siedem lat.

³¹ Podobnie jak Einstein, Lemaître miał silną filozoficzną skłonność do przestrzennie skończonego wszechświata.

³² W 2018 roku Międzynarodowa Unia Astronomiczna przyjęła uchwałę, zgodnie z którą relację tę należy nazywać prawem Hubble’a-Lemaître’a.

³³ Na podstawie dokładniejszych obserwacji dwudziestu czterech galaktyk Hubble uzyskał wartość stałej proporcjonalności H występującej w relacji prędkość-odległość [tutaj](#) 513 km/s na każde trzy miliony lat świetlnych odległości — niewiele odbiegającą od znalezionej wcześniej przez Lemaître’a. Hubble i Milton L. Humason zinterpretowali swoje wyniki w kategoriach zwykłego przesunięcia Dopplera.

³⁴ Albert Einstein, list do Tolmana, 1931, w: Albert Einstein Archives, Archivnummer 23–030.

³⁵ Arthur Stanley Eddington, *The Expanding Universe* (Cambridge: Cambridge University Press, 1933), s. 24.

³⁶ Georges Lemaître, *Evolution of the expanding universe*, „Proceedings of the National Academy of Sciences” 20, s. 12–17.

³⁷ Albert Einstein, list do Lemaître’a, 1947, w: Archives Georges Lemaître, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, A4006.

³⁸ Obserwacje przesunięcia ku czerwieni Hubble’a i Humasona dają nam wgląd we wszechświat jedynie na dystansie kilku milionów lat świetlnych. Dlatego ich pomiary określiły tempo ekspansji w ostatnich czasach, ale nie mówiły nic o tym, jak ewoluowało ono w całej historii wszechświata. W złotych latach dziewięćdziesiątych obserwacje widmowe wybuchów jasných supernowych, które można było dostrzec z odległości miliardów lat świetlnych, umożliwiły zrekonstruowanie sposobu ekspansji wszechświata miliardy lat wstecz. To pokazało, że około czterech miliardów lat temu nasz wszechświat przeszedł od spowalniającej do przyspieszającej ekspansji.

³⁹ Georges Lemaître, *Discussion sur l’évolution de l’univers* (Paris: Gauthier-Villars, 1933), s. 15–22.

⁴⁰ Lemaître należał do nowego pokolenia astronomów matematycznych przekonanych, że przyszłość astronomii będzie uwzględniać czystą analizę i programowanie komputerowe. Jego badania obliczeniowe bardzo ściśle podążały za rozwojem technologii komputerowej. Na początku lat dwudziestych pomagał Vannevarowi Bushowi w MIT, testując analizator różnicowy na problemie Störmera. Później przeniósł swoje obliczenia torów promieni kosmicznych z tablic logarytmicznych do ręcznie obsługiwanych sumatorów, następnie do elektrycznych maszyn biurowych i zautomatyzowanych maszyn księgowych, aż wreszcie zrealizował swoje marzenie, gdy Douglas Hartree umożliwił mu dostęp do komputera

zbudowanego na bazie lamp elektronowych, opracowywanego na Uniwersytecie w Cambridge w latach pięćdziesiątych.

⁴¹ Arthur S. Eddington, *The End of the World: from the Standpoint of Mathematical Physics*, „Nature” 127, nr 2130 (21 marca 1931), s. 447–453.

⁴² Lemaître, *Revue des Questions scientifiques*, op. cit.

⁴³ Lemaître, *L’univers en expansion*, op. cit.

⁴⁴ Georges Lemaître, *The beginning of the world from the point of view of quantum theory*, „Nature” 127, nr 2130 (9 maja 1931), s. 706.

⁴⁵ P.A.M. Dirac, *The Relation Between Mathematics and Physics*, wykład wygłoszony 6 lutego 1939 roku z okazji przyznania mu nagrody Jamesa Scotta. Opublikowany w „Proceedings of the Royal Society of Edinburgh” 59, (1938–1939, część II), s. 122–129.

⁴⁶ Fred Hoyle, *The Universe: Past and Present Reflections*, „Annual Review of Astronomy and Astrophysics” 20 (1982). s. 1–36.

⁴⁷ Fred Hoyle, *The Origin of the Universe and the Origin of Religion* (Wakefield R.I.: Moyer Bell, 1993).

⁴⁸ Dużo więcej anegdot o jego barwnym życiu można znaleźć w autobiografii Gamowa *My World Line; an Informal Autobiography* (New York: Viking Press, 1970).

⁴⁹ Cięższe pierwiastki chemiczne, takie jak węgiel, zostały wytworzone znacznie później w wyniku syntezy jądrowej wewnątrz gwiazd. Pierwiastki cięższe od żelaza pojawiły się jeszcze później albo w nagłym żarze supernowych, albo w gwałtownych zderzeniach gwiazd neutronowych. Te i inne procesy uformowały bogate chemicznie środowisko współczesnego wszechświata. Z tego względu w laboratoriach fizycznych na Ziemi (a może i w innych miejscach) wytwarzane są dziś najbardziej egzotyczne ze wszystkich pierwiastków.

⁵⁰ Lambert, *Atom of the Universe*, op. cit.

⁵¹ Galileusz w 1615 roku napisał słynny list o relacji między nauką a religią do Krystyny Lotaryńskiej, wielkiej księżnej Toskanii. Cytuje w nim pewnego bardzo wybitnego duchownego, ponoć kardynała Cezarego Baroniusza, szefa biblioteki watykańskiej: „Wola Ducha Świętego jest nauczenie nas, jak zmierzać ku niebu, a nie dokąd zmierza niebo”.

⁵² Cyt. w: Duncan Aikman, *Lemaître Follows Two Paths to Truth*, „The New York Times Magazine”, 19 lutego 1933 (zob. fot. 5 na wklejce).

⁵³ Georges Lemaître, *The Primaeval Atom Hypothesis and the Problem of the Clusters of Galaxies w: La structure et l’évolution de l’univers: onzième conseil de physique tenu a l’Université de Bruxelles du 9 au 13 juin 1958*, red. R. Stoops (Bruxelles: Institut International de Physique Solvay, 1958), s. 1–30. Pochodzące od Izajasza pojęcie Boga ukrytego, *Deus absconditus*, było stałym tematem pojawiającym się w tle rozumowania Lemaître’a. Na przykład rękopis jego „manifestu” Wielkiego Wybuchu z 1931 roku opublikowany w „Nature” zawiera na końcu krótki akapit — wykreślony przed publikacją — w którym pisze: „Uważam, że każdy, kto wierzy w najwyższą istotę wspierającą

wszystkie byty i wszystkie działania, wierzy również, że Bóg jest w gruncie rzeczy ukryty i może czuć się zadowolony, widząc, jak dzisiejsza fizyka zapewnia parawan przysłaniający moment stworzenia”.

⁵⁴ Lemaître, *The Primaeval Atom Hypothesis*, op. cit.

ROZDZIAŁ 3

Kosmogeneza

Ich schreite kaum, doch wähn' ich mich schon weit.

Du siehst, mein Sohn, zum Raum wird hier die Zeit.

Prawie się nie ruszam, ale wydaje mi się, że zaszedłem daleko.

Widzisz, mój synu, tutaj czas staje się przestrzenią.

RICHARD WAGNER, *PARSIFAL*

W swym pamiętniku Stephen napisał, że zainteresował się kosmologią, ponieważ chciał osiągnąć pełnię zrozumienia. To nienasycone pragnienie zadawania coraz głębszych pytań zawiodło go do Cambridge. Przybył tam jesienią 1962 roku z Oksfordu, gdzie ukończył studia licencjackie z fizyki. „W Oksfordzie panował wówczas kult antypracy” — opisał ten okres swojego życia. „Ciężka praca, by zdobyć lepsze oceny, była uważana za wyznacznik szarego człowieka, najgorszy epitet w słowniku oksfordzkim”¹.

Kiedy przyszło do egzaminów końcowych na Oksfordzie, Stephen zdecydował się skupić na problemach z fizyki teoretycznej, ponieważ nie wymagały one dużej wiedzy praktycznej. Uzyskał wyniki na granicy pierwszego i drugiego stopnia studiów i przystąpił do rozmowy z egzaminatorami mającymi ocenić, do którego z nich należy go zakwalifikować. Stephen powiedział komisji, że jeśli przyzna mu stopień pierwszy, to przeniesie się do Cambridge, natomiast w przeciwnym wypadku zostanie w Oksfordzie. Dostał stopień pierwszy. W świetle późniejszych osiągnięć Stephena, z punktu widzenia Oksfordu musiała to być jedna z najgorszych decyzji w jego osiemsetletniej historii.

W Cambridge Stephen chciał współpracować z Hoyle'em, orędownikiem stanu stacjonarnego, mimo że jego teoria znalazła się w poważnych tarapatkach

na początku lat sześćdziesiątych². U Hoyle'a nie było jednak miejsca i Stephen został przydzielony do Dennisa Sciama. Okazało się to wspaniałym zrządzeniem losu. Sciam, student Paula Diraca, był katalizatorem, niezwykle stymulującą postacią, która zmieniła Cambridge w mekkę kosmologii relatywistycznej. Pilnie śledząc najważniejsze osiągnięcia fizyki na całym świecie, Sciam miał pewność, że jego studenci również pozostają na bieżąco z najnowszymi odkryciami. Ilekroć publikowano interesującą pracę, wyznaczał jednego ze swoich podopiecznych do jej omówienia. Za każdym razem, gdy w Londynie planowano interesujący wykład, wysyłał ich tam pociągami, żeby mogli uczestniczyć w odczycie. Stephen rozwijał się w interaktywnym, tętniącym życiu i ambitnym środowisku naukowym ukształtowanym przez Sciamę, a później będzie się starał stworzyć równie stymulujące otoczenie dla swoich studentów.

Kiedy Stephen przybył do Trinity Hall w Cambridge, Sciam również był zwolennikiem modelu stacjonarnego wszechświata. Poleciał Stephenowi zająć się wersją, którą opracował Hoyle, próbując uratować tę teorię. Wkrótce Stephen odkrył nieskończoności w nowym podejściu Hoyle'a, które wskazywały, że ta teoria została źle zdefiniowana, i rzucił wyzwanie Hoyle'owi w tej kwestii na spotkaniu Towarzystwa Królewskiego w Londynie w 1964 roku. Kiedy Hoyle zapytał: „Skąd to wiesz?”, Stephen, nie dając się zastraszyć czołowemu brytyjskiemu astrofizykowi, odpowiedział: „Ponieważ to policzyłem!” — był to wczesny objaw zarówno jego niezależnego charakteru, jak i zamiłowania do dramaturgii. Analiza teorii stanu stacjonarnego stała się pierwszym rozdziałem jego rozprawy doktorskiej.

Ostatni gwóźdź do trumny kosmologii stanu stacjonarnego został wbity kilka miesięcy później wraz z odkryciem kosmicznego mikrofalowego promieniowania tła. Istnienie tej pradawnej poświaty dowiodło ponad wszelką wątpliwość, że wszechświat nie znajdował się w stanie stacjonarnym, lecz kiedyś był całkowicie inny — bardzo gorący. Ale czy to też oznaczało, że musiał mieć początek? Najwyraźniej było to teraz kluczowe pytanie dla

kosmologii Wielkiego Wybuchu, a Stephen był gotowy, aby podjąć próbę udzielenia na nie odpowiedzi.

Sciama skontaktował Stephena z Rogerem Penrose'em, który właśnie opublikował swój trzystronicowy przełomowy artykuł pokazujący, że czarne dziury powinny być wszechobecne we wszechświecie. Penrose udowodnił, że jeśli ogólna teoria względności jest poprawna, zapadanie się grawitacyjne gwiazd o odpowiedniej masie prowadzi do powstania osobliwości czasoprzestrzeni, która jest ukryta przed światem zewnętrznym pod horyzontem zdarzeń: w czarnej dziurze.

Stephen wkrótce zdał sobie sprawę, że jeśli odwróci kierunek upływu czasu w matematycznym rozumowaniu Penrose'a, tak aby zapadanie stało się ekspansją, będzie mógł udowodnić, że rozszerzający się wszechświat musiał mieć w przeszłości osobliwość³. Pracując z Penrose'em, wyprowadził serię twierdzeń matematycznych, które wykazały, że jeśli prześledzi się historię rozszerzającego się wszechświata wstecz, do epoki poprzedzającej narodziny pierwszych gwiazd i galaktyk, a nawet przed fotografią CMB, to ostatecznie dociera się do osobliwości, w której czasoprzestrzeń zagina się do punktu krytycznego.

Obie strony równania Einsteina stają się nieskończone w osobliwości — nieskończona krzywizna czasoprzestrzeni „równa się” nieskończonej gęstości materii. Jest to jednak problem, gdyż oznacza to, że teoria traci wszelką zdolność predykcyjną. Przypomina to dzielenie przez zero na kalkulatorze: dostajemy nieskończoność i cokolwiek obliczymy dalej, nie ma to sensu. Osobliwości są tak naprawdę brzegami czasoprzestrzeni, gdzie ogólna teoria względności nie daje wskazówek co do tego, co tam się dzieje. Nawet samo określenie „dziać się” traci znaczenie w osobliwości czasoprzestrzennej.

Penrose wykazał, że według teorii względności czas musi zanikać w czarnych dziurach. Argument Stephena wykorzystujący odwrócenie czasu dowiódł, że rozszerzający się wszechświat musi zawierać początek czasu. To

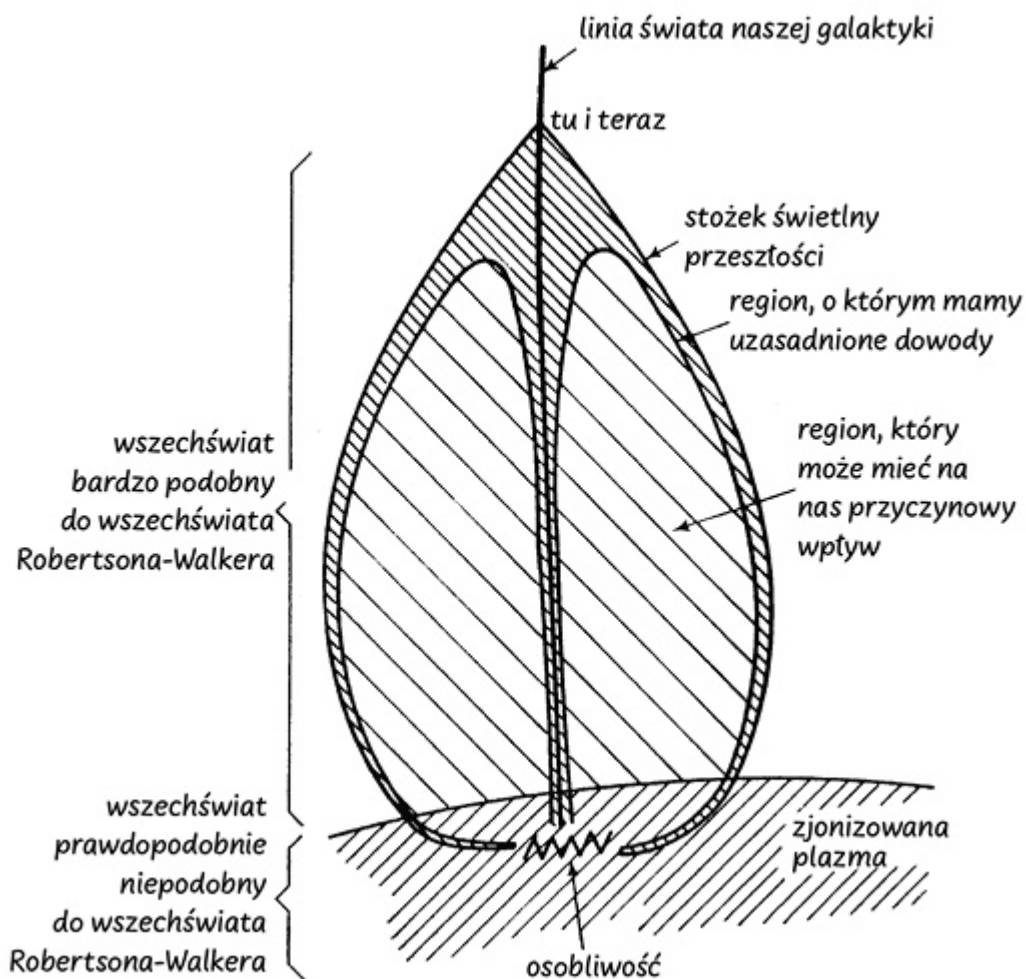
nie tak, że osobliwość Wielkiego Wybuchu znajdowała się tam niczym kosmiczne jajo, czekając na wyklucie się wszechświata. Osobliwość raczej sygnalizuje narodziny samego czasu. Twierdzenie Stephena pokazało, że zero czasu w idealnie sferycznych modelach wszechświatów Friedmanna i Lemaître'a nie wynikało z prostoty tych modeli, lecz pochodziło z opartych na solidnych podstawach i uniwersalnych przewidywaniach kosmologii relatywistycznej. Stanowiło to najważniejszy wynik jego rozprawy doktorskiej z 1966 roku, który później został opisany w biografii filmowej *Teoria wszystkiego*. W streszczeniu swej pracy Hawking napisał: „Przeanalizowano niektóre wnioski i konsekwencje rozszerzania się wszechświata. [...] Rozdział czwarty dotyczy występowania osobliwości w modelach kosmologicznych. Wykazano, że pojawienie się osobliwości jest nieuniknione pod warunkiem spełnienia pewnych bardzo ogólnych warunków”.

To niezwykły wynik. Spacerując po powierzchni Ziemi w miejscach takich jak Wielki Kanion, można znaleźć skały, których wiek wynosi kilka miliardów lat. Najprostsze formy życia bakteryjnego na Ziemi mają około 3,5 miliarda lat, a sama nasza planeta jest niewiele starsza — liczy sobie około 4,6 miliarda lat. Twierdzenie o osobliwości Wielkiego Wybuchu mówi, że gdybyśmy cofnęli się do czasu zaledwie trzykrotnie wcześniejszego — 13,8 miliarda lat temu — nie byłoby czasu, przestrzeni, niczego. Z tej perspektywy jesteśmy całkiem blisko początku wszystkiego.

Gdyby Stephen nadal żył pięćdziesiąt cztery lata później, prawdopodobnie też otrzymałby Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki w 2020 roku za niezwykle ważną pracę z Penrose'em na temat początku i końca czasu. Obraz naszej przeszłości wyłaniający się z jego badań doktoranckich to gruszkowaty obszar czasoprzestrzeni, taki jak pokazany na ilustracji 18. Została ona wykonana przez George'a Ellisa⁴, innego studenta Sciama, który pracował ze Stephenem nad twierdzeniami o osobliwościach w połowie lat sześćdziesiątych. Znajdujemy się na czubku tej gruszki. Jej powierzchnię wyznaczają promienie

światłne docierające do nas z różnych kierunków na niebie. Wykres pokazuje wpływ materii na kształt naszego stożka świetlnego przeszłości. Widzimy, że masa materii powoduje, iż promienie świetlne odchylają się od linii prostych i zbiegają się, gdy podążamy wzdłuż ich torów głębiej w czasie. Na skutek tego proste stożki świetlne z ilustracji 8 i 9, ignorujące ten efekt skupiania grawitacyjnego wywołanego obecnością materii, ulegają deformacji w prawdziwym wszechświecie i zakrzywiają się do środka, tworząc powierzchnię w kształcie gruszki — nasz stożek świetlny przeszłości — który oddziela skończony obszar czasoprzestrzeni, który może mieć na nas wpływ, czyli wnętrze gruszki, od reszty wszechświata, która na nas nie wpływa. Sedno twierdzenia Stephena o osobliwościach polega na tym, że jeśli materia powoduje zbieganie stożków świetlnych przeszłości w ten sposób, to historia **n i e m o ż e** się rozciągać w nieskończoność. Zamiast tego dochodzi się do końcowej chwili, granicy przeszłości, gdzie nie ma już wszechświata przestrzeni i czasu.

Rysunek Ellisa to kosmologiczny odpowiednik kultowej ilustracji Penrose'a o powstawaniu czarnej dziury pokazanej na ilustracji 11. Porównując oba rysunki, widzimy, że przeszłość obserwatora w kosmologii jest bardzo podobna do przyszłości wewnątrz masywnej gwiazdy — obie istnieją tylko przez skończoną ilość czasu. Ale jest też jedna zasadnicza różnica. Podczas gdy horyzont zdarzeń czarnej dziury chroni zewnętrznego obserwatora przed przemocą osobliwości znajdującej się w środku, osobliwość Wielkiego Wybuchu leży **w e w n ą t r z** naszego kosmologicznego horyzontu. Rozszerzający się wszechświat przypomina bardziej czarną dziurę wywróconą na lewą stronę. Początkowa osobliwość tworzy całkiem dosłownie krawędź przeszłości naszego stożka świetlnego przeszłości. W zasadzie jest tam po to, abyśmy mogli ją ujrzeć, wyraźnie rysującą się na niebie.



II. 18. Rysunek George'a Ellisa z 1971 roku przedstawiający obserwowalny wszechświat i jego (mocniej zacienione) fragmenty, które możemy zaobserwować z pewnymi szczegółami. Znajdujemy się na czubku, gdzie jest napisane „tu i teraz”. Materia powoduje, że promienie światła zbiegają się w przeszłości, zaginając nasz stożek świetlny przeszłości do wewnątrz, i modelują gruszkowaty obszar: naszą przeszłość. Ponieważ światło wyznacza kosmiczną prędkość graniczną, jest to jedyna część wszechświata, którą zasadniczo możemy obserwować. Zgodnie z twierdzeniem Stephena Hawkinga skupienie promieni świetlnych w przeszłości oznacza, że przeszłość musi się zakończyć początkową osobliwością. Jednak nie możemy zajrzeć bezpośrednio do samej osobliwości, ponieważ fotony — cząstki światła — nieustannie rozpraszają się na wszystkim innym w gorącej zjonizowanej plazmie wypełniającej pierwotny wszechświat, co czyni go nieprzejrzystym.

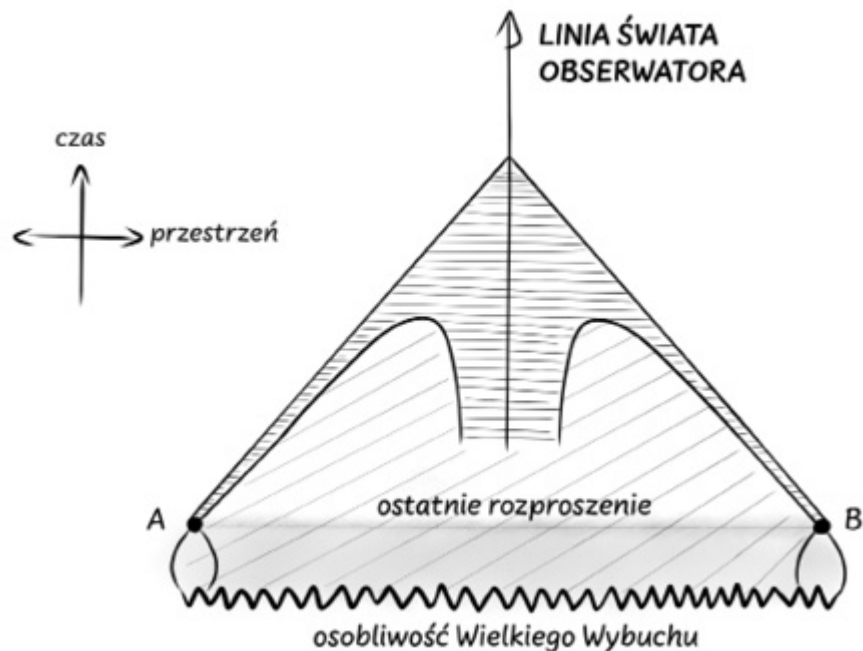
Oczywiście nie możemy łatwo cofnąć się w naszych obserwacjach do początku, ponieważ nieustanne rozpraszanie cząstek światła w najwcześniejszych stadiach ekspansji przesłania nam widok. Patrzenie wstecz na Wielki Wybuch jest trochę jak spoglądanie na Słońce. W przypadku Słońca to, co widzimy jako dość ostrą krawędź, jest w istocie powierzchnią, na której fotony powstałe w wyniku reakcji syntezy jądrowej głęboko wewnątrz Słońca rozpraszają się po raz ostatni. Z tej powierzchni, zwanej fotosferą, fotony podążają w naszym kierunku bez przeszkód. Ale to rozpraszanie się fotonów uniemożliwia nam bezpośredni wgląd do środka. Wnętrze Słońca jest nieprzejrzyste dla cząstek światła, czyli jest nieprzezroczyste.

Podobnie nieustanne rozpraszanie się fotonów w gorącej plazmie wypełniającej wczesny wszechświat tworzy mgłę uniemożliwiającą spoglądanie aż do samego początku, przynajmniej za pomocą teleskopów zbierających fotony. Nowo narodzony wszechświat stał się przezroczysty dopiero trzysta osiemdziesiąt tysięcy lat po Wielkim Wybuchu, kiedy ochłodził się do przyjemnych trzech tysięcy stopni Celsjusza. W tej temperaturze energetycznie korzystne stało się łączenie jąder atomowych z elektronami w elektrycznie obojętne atomy, nie pozostawiając prawie żadnych swobodnie poruszających się elektronów rozpraszających cząstki światła. Długości fal fotonów, które wówczas zaczęły się przemieszczać bez przeszkód w przestrzeni, stopniowo rozciągały się tysiąckrotnie wraz z ekspansją. To, co na początku było światłem czerwonym, dociera do nas dzisiaj, miliardy lat później, jako zimne promieniowanie mikrofalowe. Ilustracja 2 zamieszczona w rozdziale 1 przedstawia mapę kosmicznego promieniowania mikrofalowego. Uzyskujemy obraz wszechświata w momencie, gdy stał się przezroczysty. Jednocześnie jednak przysłonięty został widok wcześniejszych epok. Mapa CMB jest kosmologicznym odpowiednikiem „widzianej od wewnątrz” fotosfery słonecznej.

Osobliwość ograniczająca naszą przeszłość w ogólnej teorii względności

uwytatnia, jak bardzo zagadkowy jest fakt, że reliktowe promieniowanie CMB jest rozłożone niemal równomiernie w całej przestrzeni. Jak wspomniałem w rozdziale 1, plamki na ilustracji 2 odpowiadają zmianom temperatury na niebie, które są wszędzie mniejsze niż jedna dziesięciotysięczna stopnia. Najwyraźniej Wielki Wybuch rozegrał się niemal dokładnie w ten sam sposób we wszystkich regionach obserwowalnego wszechświata. To jedna z jego osobliwych, sprzyjających życiu właściwości. W przypadku fotosfery słonecznej niemal jednolita temperatura jest dokładnie tym, czego można się spodziewać, gdyż wszystkie fotony wypromieniowane z powierzchni Słońca wymieniają ciepło poprzez oddziaływania w jego wnętrzu. Doprowadziło to w naturalny sposób do uzyskania niemal tej samej temperatury, tak jak zimne mleko szybko osiąga jednakową temperaturę z gorącą herbatą (przynajmniej w Wielkiej Brytanii).

Ale wydawało się, że oddziaływania nie były w stanie wygładzić promieniowania CMB, ponieważ od osobliwości nie upłynęło wystarczająco dużo czasu, aby jakikolwiek proces fizyczny — nawet zachodzący z prędkością światła — zdołał zniwelować różnice temperatur, zanim pradawne fotony zostały uwolnione i zaczęły swobodnie podążać w przestrzeni. To zjawisko przedstawia ilustracja 19. Mikrofalowe fotony tła docierające do nas z przeciwnych kierunków na niebie zaczynają swą podróż w punktach A i B naszego stożka świetlnego przeszłości, ale stożki każdego z tych punktów nie przecinają się na samym początku. Oznacza to, że żaden sygnał świetlny nie mógł zostać przekazany między punktami A i B od czasu Wielkiego Wybuchu. A ponieważ prędkość światła wyznacza górną granicę tempa poruszania się dowolnego sygnału, oznacza to, że żaden proces fizyczny nie mógł utworzyć powiązanego ze sobą środowiska obejmującego A i B. Fizycy mówią, że te rejony wokół A i B leżą poza własnym horyzontem kosmologicznym.



II. 19. Nasza przeszłość według modelu gorącego Wielkiego Wybuchu z lat sześćdziesiątych. Znajdujemy się tu i teraz na czubku stożka. Fotony mikrofalowego promieniowania tła docierające do nas z przeciwnych kierunków na niebie pochodzą z punktów A i B na naszym stożku świetlnym przeszłości. Punkty te znajdują się daleko poza swoimi horyzontami kosmologicznymi: ich stożki świetlne przeszłości B nie nakładają się na siebie, nawet jeśli zostaną przedłużone do samego początku. Jednak obserwujemy, że temperatura fotonów docierających z A i B jest taka sama z dokładnością do jednej tysięcznej procent. Jak to możliwe?

Tak naprawdę w gorącym wszechświecie Wielkiego Wybuchu lat sześćdziesiątych, kiedy patrzymy na promieniowanie CMB w kierunkach oddalonych o więcej niż kilka stopni na niebie, bierzemy pod uwagę obszary wszechświata, które jeszcze nie miały okazji wejść ze sobą w kontakt. Cały nasz dzisiejszy obserwowalny wszechświat może zawierać co najmniej kilka milionów takich niezależnych domen wielkości kosmicznego horyzontu. To sprawia, że niemal idealna jednorodność promieniowania CMB na całym niebie jest nie tyle zagadkowa, ile wręcz tajemnicza. Gdyby Eddington lub Einstein wiedzieli o tym odkryciu, owa zagadka horyzontu mogłaby równie

dobrze potwierdzić ich najgorsze obawy dotyczące całej idei kosmicznego pochodzenia. To tak, jakby wikingowie dopłynęli do Ameryki Północnej i przekonali się, że rdzenni mieszkańcy mówią po nordycku.

To dziwna sytuacja. Twierdzenie Hawkinga o osobliwościach przewiduje, że wszechświat miał początek, ale nie mówi, jak się zaczął, nie wspominając już o tym, dlaczego wyłonił się ze swych wybuchowych narodzin z niemal jednorodnym kosmicznym mikrofalowym promieniowaniem tła i tak wieloma innymi właściwościami biofilnymi. Co więcej, wydaje się, że wszystkie pytania dotyczące ostatecznego pochodzenia wszechświata i jego projektu stawia ono poza nauką, jak gdyby przekazując je nadprzyrodzonej ingerencji Eddingtona. Nie ma sensu filozofować na ten temat — teoria względności przewiduje własny upadek. Wielki Wybuch w pracy doktorskiej Hawkinga jest wydarzeniem bez wyjaśnienia, ponieważ osobliwość na jego początku oznacza całkowite załamanie pojęć czasu, przestrzeni i przyczynowości. Jak to ujął wielki Wheeler: „Istnienie osobliwości czasoprzestrzennych oznacza koniec zasady racji dostatecznej, a więc przewidywalności uzyskanej dzięki nauce”⁵.

Jak to możliwe? Jak fizyka może prowadzić do pogwałcenia własnych zasad — do braku fizyki? Aby rozwikłać tę zagadkę, musimy przyjrzeć się bliżej temu, co fizycy tak naprawdę myślą, kiedy mówią, że przewidują, co się stanie.

Od czasów Galileusza i Newtona fizyka oparła się na pewnego rodzaju dualizmie i korzysta z dwóch wyraźnie odrębnych źródeł informacji. Po pierwsze, istnieją prawa ewolucji — równania matematyczne opisujące, jak układy fizyczne zmieniają się w czasie z jednego stanu do innego. Po drugie, mamy warunki brzegowe, czyli zwięzły opis stanu układu w określonej chwili w czasie. Prawa ewolucji biorą pod uwagę ten stan i poddają go ewolucji, wstecz lub w przód w czasie, aby określić jego konfigurację w przeszłości lub w przyszłości. To właśnie połączenie praw ewolucji i warunków brzegowych

tworzy ramy służące do przewidywania, którymi szczycą się fizyka i kosmologia.

Wyobraźmy sobie na przykład, że chcemy przewidzieć, gdzie i kiedy nastąpi kolejne zaćmienie Słońca. W tym celu możemy zastosować Newtonowskie prawa ruchu i powszechnego ciężenia do opisanie trajektorii Ziemi i Księżyca w przyszłości. Aby jednak zastosować te prawa, musimy najpierw określić położenie i prędkość Ziemi i Księżyca w pewnej określonej chwili. Te dane są warunkami brzegowymi. Opisuja stan tych dwóch ciał niebieskich w szczególnym momencie. Nikt nie oczekuje, że prawa Newtona wyjaśnią, dlaczego te położenia są takie, jakie są w owej chwili. Zamiast tego mierzymy ich wartość. Mając dostęp do tych informacji, rozwiązujemy równania Newtona, określając pozycje ciał w przyszłości, by przewidzieć miejsce i czas przyszłych zaćmień Słońca lub wytłumaczyć wcześniej udokumentowane zaćmienia.

Ten przykład jest reprezentatywny dla sposobu powstawania przewidywań w fizyce. Fizycy zakładają, że ewolucją rządzą uniwersalne prawa natury — prawa, które staramy się odkryć. Ale warunki brzegowe zawierają informacje właściwe dla konkretnego układu, więc nie są uważane za część praw. Warunki brzegowe w pewnym sensie służą do sformułowania konkretnych pytań, jakie stawiamy prawom fizycznym. Skutkiem tego dane prawo dynamiczne, na przykład newtonowskie, jest skonstruowane w taki sposób, aby uwzględnić szeroki zakres różnych warunków brzegowych. Nadaje to równaniom ich uniwersalny charakter i elastyczność niezbędną do wyjaśniania szerokiej gamy zjawisk. Tak więc prawa fizyki przypominają zasady gry w szachy. Niezależnie od tego, jak bardzo te reguły są ważne, mówią tylko o tym, jak rozegra się każda konkretna gra.

Ale czy ten rozdźwięk między dynamiką rządzącą się prawami a dowolnie wybieranymi przez nas warunkami brzegowymi jest fundamentalną właściwością natury? To rozróżnienie jest oczywiście całkowicie naturalne i właściwe w sytuacjach laboratoryjnych, w których rzeczywiście istnieje

wyraźna różnica między kontrolowanym układem eksperymentalnym — warunkami brzegowymi — a prawami, które chcemy przetestować, przeprowadzając eksperyment. Jednak to rozróżnienie może się stać poważnym problemem w kosmologii, gdy osadzimy nasze eksperymenty i eksperymentatorów, naszą planetę, gwiazdy i galaktyki w znacznie szerszej ewolucji wszechświata jako całości. Kiedy postępujemy w ten sposób, warunki brzegowe pierwotnego eksperymentu są włączane do opartej na prawach ewolucji większego układu wraz z warunkami brzegowymi nałożonymi na ten ostatni. Wracając do przykładu zaćmienia Słońca, kosmolog mógłby powiedzieć, że prędkość i położenie planet w dowolnym momencie — pierwotne warunki brzegowe — wynikają z ich przeszłości, a sam nasz układ planetarny jest wynikiem historii formowania się Układu Słonecznego, który z kolei powstał z kondensacji pozostałości wcześniejszych układów gwiazdnych, których zalążki ostatecznie wyrosły z drobnych zmian gęstości w pierwotnym wszechświecie, które pochodziły z... czego?

Kiedy docieramy do początku, stajemy oko w oko z paradoksem. Co określa ostateczne warunki brzegowe u zarania wszechświata? Najwyraźniej ich wybór nie zależy od nas i nie możemy wypróbować innych warunków, aby sprawdzić, do jakich wszechświatów doprowadzą. Oznacza to, że początek wszechświata stwarza problem warunków brzegowych, których **nie** kontrolujemy. Zamiast tego, co bardzo interesujące, warunki Wielkiego Wybuchu wydają się wplecione w prawa, które staramy się zrozumieć.

Jednak dualizm w fizyce oznacza, że warunki brzegowe nie są częścią praw fizycznych. Co więcej, rozpad czasoprzestrzeni w początkowej osobliwości wydaje się potwierdzać ten pogląd. Zwróćmy uwagę, że paradoks ten pojawia się tylko w kontekście kosmologicznym, ponieważ dopiero gdy analizujemy ewolucję wszechświata jako całości, nie mamy do dyspozycji wcześniejszego momentu ani większego pojemnika, który możemy wykorzystać do określenia warunków brzegowych.

Bardziej niż którykolwiek inny fizyk swego pokolenia Stephen uważał, że

naukowe zrozumienie początku wszechświata może wymagać prawdziwego rozszerzenia wielowiekowych ram predykcyjnych w fizyce. Czuł, że podział na dynamikę i warunki brzegowe jest zbyt wąskim sposobem myślenia o świecie. Już w swojej rozprawie doktorskiej wskazał ten problem, pisząc: „Jedną ze słabości teorii względności Einsteina jest to, że choć wyposaża nas w dynamiczne równania pola, nie zapewnia dla nich warunków brzegowych. Tak więc teoria Einsteina nie daje unikalnego modelu wszechświata. Oczywiście teoria, która by zapewniała warunki brzegowe, byłaby bardzo atrakcyjna... Teoria Hoyle'a ma właśnie tę zaletę. Niestety, jej warunek brzegowy wyklucza wszechświaty, które wydają się odpowiadać rzeczywistemu wszechświatowi, czyli rozszerzające się modele”.

Omówił to zagadnienie w swoim wykładzie inauguracyjnym, obejmując katedrę Lucasa prawie piętnaście lat później. Katedra matematyki Lucasa została ustanowiona w 1663 roku z rocznym stypendium w wysokości stu funtów przez Henry'ego Lucasa, byłego studenta Kolegium św. Jana, filantropa i polityka, który reprezentował Uniwersytet w Cambridge w parlamencie. Od 1669 do 1702 na stanowisku jej kierownika zasiadał sam Isaac Newton (Stephen często żartował, że wtedy jego fotel nie mógł się przemieszczać). Na szczęście dla Newtona akt powołujący do życia tę katedrę zawierał warunek, że jej posiadacz nie powinien być wyświęcony przez Kościół anglikański. Oznaczało to, że Newton był zwolniony z przysięgi na wiarę w Trójcę Świętą — którego to warunku nie mógłby spełnić⁶.

Stephen objął katedrę Lucasa w 1979 roku jako jej siedemnasty profesor. W swoim wykładzie inauguracyjnym zatytułowanym *Czy jesteśmy świadkami końca fizyki teoretycznej?* w zenicie swej wiary w potęgę teorii fizycznej w kontrowersyjny sposób przewidywał, że do końca stulecia fizycy odkryją teorię wszystkiego. Lecz przy okazji stwierdził: „Pełna teoria zawiera oprócz teorii dynamiki także zbiór warunków brzegowych”. Rozwijając swoją myśl, oznajmił: „Wiele osób twierdzi, że rola nauki ogranicza się do pierwszego z tych dwóch elementów i że fizyka teoretyczna osiągnie swój cel, gdy

znajdziemy zestaw lokalnych praw dynamicznych. Uważają kwestię warunków brzegowych wszechświata za zagadnienie należące do dziedziny metafizyki lub religii. Ale nie znajdziemy się w posiadaniu kompletnej teorii, dopóki nie będziemy mogli powiedzieć czegoś ponad to, że rzeczy są takie, jakie są, ponieważ były takie, jakie były”.

Stephen, wiecznie optymistyczny i ambitny, nie był przygotowany do stania się zakładnikiem własnego twierdzenia o osobliwościach. Zdaniem jego i innych naukowców początkowa osobliwość w istocie nie mówi nam, że początek Wielkiego Wybuchu musi pozostać poza zasięgiem naszych badań naukowych, ale że opis grawitacji Einsteina w kategoriach plastycznej czasoprzestrzeni zawodzi w ekstremalnych warunkach panujących podczas narodzin wszechświata. Kiedy zagłębimy się w Wielki Wybuch, małoskalowa losowość teorii kwantowej staje się istotna. Można powiedzieć, że przestrzeń i czas desperacko chcą wyrwać się z mocno zawężonych ram narzuconych przez deterministyczną teorię Einsteina. W końcu czasoprzestrzeń w ogólnej teorii względności — mimo swoich ugięć i zakrzywień — pozostaje bardzo ograniczoną strukturą składającą się ze szczególnej sekwencji kształtów przestrzeni, drobiazgowo dopasowanych do siebie niczym matrioszki, jedna w drugiej, aby stworzyć czterowymiarową czasoprzestrzeń.

Bardziej niż cokolwiek innego twierdzenie Hawkinga o osobliwościach Wielkiego Wybuchu świadczy o powadze konfliktu między teorią względności a teorią kwantową. To wzmocniło intuicję Lemaître’a dotyczącą tego, że kosmogeneza jest zjawiskiem w pełni kwantowym i że jeśli mamy mieć szansę rozwikłać zagadkę projektu na podstawie naukowej, powinniśmy w jakiś sposób połączyć ze sobą zasady tych dwóch pozornie sprzecznych opowieści o naturze. Sednem wizji Stephena było to, że ten związek może być czymś więcej niż tylko udoskonaleniem istniejących ram predykcyjnych w fizyce, czyli że będzie wymagać od nas ponownego przemyślenia samych ram. Jego pomysł polegał na wyprowadzeniu fizyki poza jej odwieczny dualizm praw i warunków czy ewolucji i kreacji.

Mechanika kwantowa, drugi filar współczesnej fizyki, pojawiła się do tej pory już kilka razy. Teoria ta ma swe korzenie w wielu tajemniczych eksperymentach z atomami i światłem we wczesnych latach XX wieku, których nie można było wyjaśnić w ramach żadnej gałęzi mechaniki klasycznej Newtona. Jej sformułowanie w burzliwych początkowych latach XX wieku jest jednym z najlepszych przykładów współpracy międzynarodowej w historii ludzkości. W ciągu minionego stulecia mechanika kwantowa świętowała kolejne sukcesy i stała się najpotężniejszą i najdokładniej przetestowaną teorią naukową wszech czasów. Stosuje się ją do wszystkich znanych typów cząstek. Od najdrobniejszych szczegółów dotyczących oddziaływań cząstek elementarnych po syntezę atomów w odległych gwiazdach — przewidywania mechaniki kwantowej są doskonale zgodne z danymi eksperymentalnymi. I tak jak klasyczna teoria elektromagnetyzmu Maxwella położyła podwaliny pod pierwszą rewolucję przemysłową, tak zasady teorii kwantowej stanowią podstawę dzisiejszej technologii. Do tej pory tak naprawdę mieliśmy okazję obserwować tylko wierzchołek góry lodowej tego, co ma do zaoferowania technologia kwantowa. W niedalekiej przyszłości fizycy i inżynierowie mają nadzieję wykorzystać wewnętrzną nieokreśloność mikroświata do przechowywania i przetwarzania informacji w nowy sposób, manipulując pojedynczymi bitami kwantowymi, czyli **k u b i t a m i**, torując tym samym drogę do epoki obliczeń kwantowych.

Rewolucja kwantowa rozpoczęła się w 1900 roku, kiedy niemiecki fizyk Max Planck zasugerował, że każde ciało po podgrzaniu emituje promieniowanie w pojedynczych małych pakietach, które nazwał **k w a n t a m i**.

Planck usiłował wyjaśnić, jak wiele światła każdej barwy wypromieniowuje gorące ciało. Wiedział z klasycznej teorii Maxwella, że światło składa się z fal elektromagnetycznych o różnych częstotliwościach oscylacji odpowiadających różnym kolorom. Kłopot polegał na tym, że fizyka

klasyczna przewidywała też, że energia wypromieniowana przez gorące ciało powinna się równo dzielić między fale o wszystkich częstotliwościach. Ponieważ w teorii Maxwella mogą się pojawiać fale elektromagnetyczne o dowolnie dużych częstotliwościach, oznaczało to, że całkowita wypromieniowana energia — zsumowana po wszystkich częstotliwościach — powinna być nieskończona, co oczywiście było absurdem. Była to owa druga ciemna chmura lorda Kelvina unosząca się nad fizyką klasyczną. Stała się znana jako „katastrofa w nadfiolecie” fizyki klasycznej, ponieważ najwyższe częstotliwości światła widzialnego to fiolet, więc „nadfiolet” odnosi się do bardzo wysokich częstotliwości.

W „akcie rozpaczy”, jak później nazwał swoje postępowanie, Planck zaproponował śmiałą nową zasadę, mówiącą, że światło i wszystkie inne fale elektromagnetyczne mogą być emitowane tylko w odrębnych kwantach, a energia każdego kwantu jest tym większa, im wyższa jest częstotliwość fal. To gwałtownie ograniczyło emisję fal o wysokich częstotliwościach, unikając w ten sposób katastrofy w nadfiolecie. W 1905 roku Einstein poszedł dalej i wykazał, że elektrony poruszające się w metalach mogą pochłaniać światło tylko w pojedynczych kwantach, które opisał jako maleńkie cząstki lub fotony. Co ciekawe, te wczesne koncepcje kwantów sugerowały, że światło ma zarówno właściwości falowe, jak i korpuskularne, co spowodowało spore zamieszanie.

Zamęt jeszcze się zwiększył, gdy duński fizyk Niels Bohr odwołał się do kwantyzacji — podobnie jak Planck w przypadku światła — aby wyjaśnić istnienie stabilnych atomów, kolejnej oczywistej właściwości świata fizycznego. Bohr, na którego cześć nazwano pierwiastek bor, pobierał nauki w Manchesterze u brytyjskiego fizyka Ernesta Rutherforda, którego eksperymenty wykazały, że wewnętrzna struktura atomów składa się głównie z pustej przestrzeni oraz maleńkiego jądra w jego centrum. Rutherford rozumiał atomy jako miniaturowe układy słoneczne, w których ujemnie naładowane elektrony krążą wokół gęstego centralnego jądra zawierającego

ładunek dodatni. Ponieważ przeciwne ładunki przyciągają się, elektrony są utrzymywane na orbicie wokół jądra. Problem z tym modelem polegał na tym, że zgodnie z klasyczną teorią elektromagnetyzmu Maxwella poruszające się po orbicie elektrony wypromieniowują energię, co powinno prowadzić do ich ruchu po spirali do wnętrza atomu i spadnięcia na jądro. Oznaczałoby to, że wszystkie atomy we wszechświecie błyskawicznie by się zapadły — i nie byłoby nas. Aby zniwelować tę oczywistą sprzeczność z rzeczywistością, Bohr zasugerował, że elektrony nie mogą krążyć w dowolnej odległości od jądra, lecz tylko po określonych, oddzielnych promieniach. Czyli Bohr **s k w a n t o w a ł** dozwolone orbity elektronów. To rozdzielenie orbit powstrzymało elektrony przed podążaniem ruchem spiralnym w kierunku jądra, ratując atomy przed szybkim — w teorii — zapadnięciem się. Za to odkrycie Bohr otrzymał Nagrodę Nobla w 1922 roku.

Pionierzy kwantowi zebrali się w Brukseli w 1911 roku na zaproszenie belgijskiego przemysłowca Ernesta Solvaya na jednej z pierwszych międzynarodowych konferencji fizycznych. Był to czas, kiedy internacjonalizm był pielęgnowany jako rodzaj polityki wewnętrznej w Belgii.

Solvay był liberalnym wizjonerem, który dorobił się fortuny, przekształcając wynaleziony przez siebie nowy proces syntezy węgla sodu w rozległą sieć przemysłową. Po wycofaniu się z biznesu stał się gorliwym alpinistą, który kilkakrotnie wspiął się na Matterhorn, a także zainteresował wspinaczką belgijskiego króla Alberta I, choć ostatecznie z nieprzewidzianymi i katastrofalnymi konsekwencjami.

Pierwszy Kongres Solvaya osiągnął mityczny status, jako że to właśnie tutaj, w luksusowym hotelu Métropole w centrum Brukseli, naukowcy wreszcie zrozumieli łamiące paradygmat wnioski płynące z wczesnych idei kwantowych. Kongres, któremu przewodniczył wybitny holenderski fizyk Hendrik Lorentz, stanowił punkt zwrotny między fizyką klasyczną XIX wieku a fizyką kwantową, która zdominuje wiek XX. Przemówienie otwierające Lorentza przepełnione jest rozterkami, jakie ten mistrz fizyki klasycznej

przeżywał w obliczu pierwszych przeblysków rodzącego się świata kwantowego. „Współczesne badania napotykać coraz poważniejsze trudności przy próbie opisu ruchu mniejszych cząstek materii. [...] W tej chwili, delikatnie mówiąc, nie jesteśmy w pełni usatysfakcjonowani [...]. Zamiast tego czujemy, że znaleźliśmy się w impasie; dawne teorie okazały się bezsilne, by przeniknąć otaczające nas ciemności”⁷.

Na kongresie co prawda wszystko omówiono, ale nic nie ustalono. Jego uczestnicy byli zdezorientowani i pozostawali podzieleni w kwestii tego, czy fizykę klasyczną można poddać jeszcze jakiejś korekcie, aby pomieścić w niej kwanty. Einstein uchwycił ten nastrój, mówiąc: „Choroba kwantowa wydaje się coraz bardziej beznadziejna. Nikt tak naprawdę nic nie wie. Cała sprawa byłaby rozkoszą dla ojców jezuitów. Atmosfera kongresu sprawiała wrażenie lamentu nad ruinami Jerozolimy”.

Wszystko zmieniło się w połowie lat dwudziestych, kiedy nowe pokolenie fizyków kwantowych przekształciło mechanikę atomów i cząstek subatomowych w zupełnie nową formę — mechanikę kwantową.

Kluczowym założeniem nowej mechaniki była słynna zasada nieoznaczoności cudownego dziecka niemieckiej fizyki Wernera Heisenberga: nie można jednocześnie poznać dokładnych wartości położenia i prędkości cząstki. Według jego słów: „Im dokładniej określamy położenie [cząstki], tym mniej dokładnie wyznaczamy pęd [lub prędkość] w owej chwili i na odwrót”⁸. Najlepsze, na co można liczyć w mechanice kwantowej, to rozmyty obraz, w którym znamy w przybliżeniu pozycje i prędkości cząstek.

Tak naprawdę wszystkie wielkości mierzalne podlegają nieoznaczoności kwantowej w stopniu opisanym przez zasady Heisenberga i kwantowa nieoznaczoność nie może być zredukowana przez dokładniejsze przyjrzenie się lub przez pomiar właściwości cząstek w jakiś pomysłowy sposób, który unika tych zasad. Pod tym względem różni się na przykład od przypadkowych ruchów na giełdzie, które wydają się nieprzewidywalne tylko dlatego, że

ludzie nie mają wszystkich informacji potrzebnych do ustalenia, jak będą się zachowywać akcje. Natomiast nieoznaczoność kwantową Heisenberga uważa się za zjawisko fundamentalne. Nakłada ona surowe ograniczenia na ilość informacji, które można wydobyć z układów fizycznych, nawet w teorii. Tak więc, co ciekawe, mechanika kwantowa wydaje się teorią o tym, co wiemy, ale także o tym, czego się nie dowiemy. Ta osobliwość okaże się niezwykle ważną właściwością, gdy będziemy rozważać multiświat z perspektywy kwantowej w rozdziałach 6 i 7.

Wspaniałym osiągnięciem mechaniki kwantowej w połowie lat dwudziestych XX wieku było ujęcie tego kwantowego rozmycia w odpowiedni formalizm matematyczny. Nic dziwnego, że wynikająca z tego teoria przedstawiała o wiele bardziej niepewny i płynny obraz rzeczywistości, niż sugerował nasz klasyczny sposób rozumienia. W szczególności porzuciła dawne marzenie o naukowym determinizmie, ideę, że nauka powinna być zdolna do definitywnego i precyzyjnego przewidywania przyszłego biegu wydarzeń. Ta teoria zastąpiła to pojęcie koncepcją, że możemy przewidywać jedynie prawdopodobieństwa różnych możliwych wyników pomiarów. Mechanika kwantowa głosi, że jeśli będziemy w kółko przeprowadzać ten sam eksperyment, na ogół nie uzyskamy takich samych wyników.

Rutherford najprawdopodobniej pierwszy dostrzegł tę fundamentalną warstwę indeterminizmu wplecioną w mikroświat. W roku 1899, aby zbadać wewnętrzną strukturę atomów, użył promieniotwórczego źródła — uranu — do bombardowania cienkiej złotej folii emitowanymi cząstkami alfa. Obserwując błyski światła, Rutherford wkrótce zorientował się, że kierunek i czas przybycia cząstek alfa emitowanych z radioaktywnej próbki uranu były losowe. Według teorii kwantowej dzieje się tak, ponieważ o ile jądra uranu mają określone, obliczalne **p r a w d o p o d o b i e ń s t w o** rozpadu w ustalonym przedziale czasu, o tyle nie można z góry wiedzieć, kiedy **d a n e** jądro ulegnie rozpadowi. Mechanika kwantowa przewiduje prawdopodobieństwo różnych czasów przybycia i emisji cząstek alfa

emitowanych w rozpadzie promieniotwórczej próbki, ale mówi również, że nie mamy — ani nie możemy zdobyć — żadnej wiedzy pozwalającej nam przewidzieć, gdzie i kiedy podąży określona cząstka alfa. Potęgą tej teorii — i jej dziwność — polega na tym, że wprowadza nieusuwalne jądro niepewności i losowości, dopasowując mikroświat do jego matematycznych podstaw. Prawa mechaniki kwantowej tak naprawdę mówią o szansach określonych zdarzeń, zamiast przewidywać konkretne wyniki obserwacji. Zmuszają nas do zaakceptowania faktu, że w najlepszym wypadku możemy przewidzieć prawdopodobieństwo różnych wyników.

Tę cechę prawdopodobieństwa widać najwyraźniej w teorii opracowanej przez austriackiego fizyka Erwina Schrödingera. W 1925 roku napisał on fascynujące równanie, które opisuje cząstki nie jako maleńkie obiekty punktowe, lecz jako rozciągle byty przypominające fale. Równanie Schrödingera stało się sercem teorii kwantowej. Kluczową kwestią jest jednak to, że owe fale nie są falami fizycznymi. Schrödinger nie twierdził, że fizyczne cząstki są w jakiś sposób rozmyte w przestrzeni. Fale teorii kwantowej są nieco bardziej abstrakcyjne. Bardziej przypominają „fale prawdopodobieństwa” opisujące różne **m o ż l i w e** położenia cząstek punktowych. Sposób, w jaki formalizm Schrödingera uwzględnia nieoznaczoność kwantową, polega więc na tym, że miejsca, w których wartości takiej fali są duże, to położenia, w których prawdopodobnie można znaleźć cząstkę. Miejsca, w których wartości fali są małe, to położenia, w których jest małe prawdopodobieństwo znalezienia cząstki. Można powiedzieć, że fale kwantowe nieco przypominają fale przestępczości. Tak jak pojawienie się fali przestępczości w waszym mieście oznacza większe prawdopodobieństwo, że zostanie popełnione przestępstwo, tak samo fala elektronu przyjmująca najwyższą wartość w naszym przyrządzie oznacza, że prawdopodobnie wykryjecie elektron⁹.

Biorąc pod uwagę falowy profil cząstki w pewnym momencie — fizycy nazywają go **f u n k c j ą f a l o w ą** — równanie Schrödingera

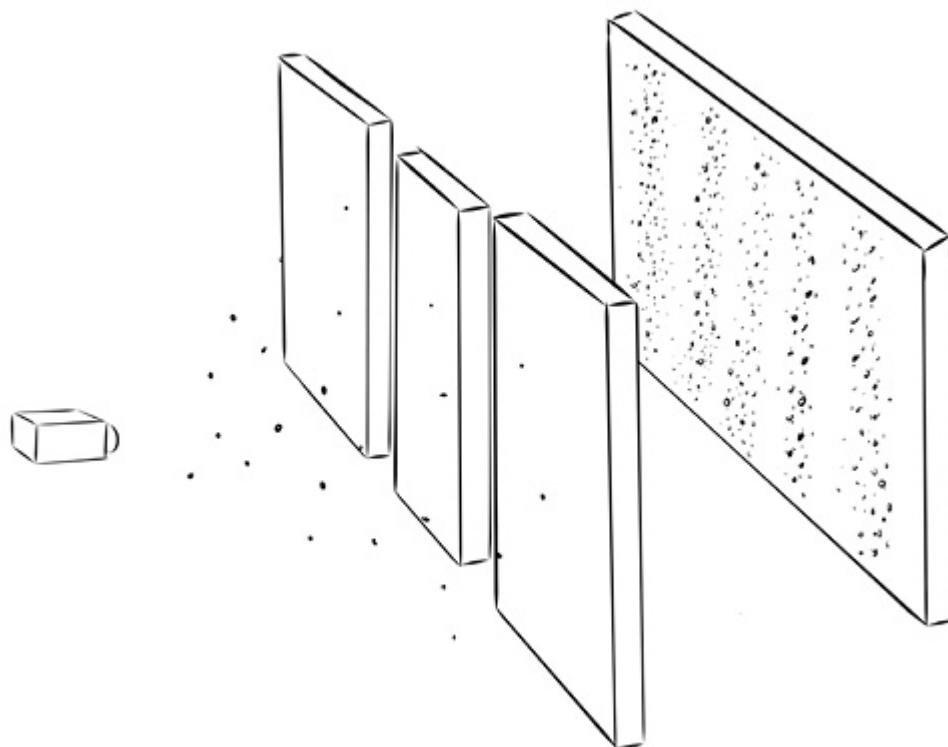
przewiduje, jak będzie on ewoluować w czasie, przyjmując większą wartość w jednych miejscach, a mniejszą w innych. Zatem teoria kwantowa podlega owemu dualistycznemu schematowi predykcyjnemu, jaki naszkicowałem powyżej, z dynamiką wynikającą z praw w opozycji do warunków brzegowych. Równanie Schrödingera jest prawem ewolucji i wymaga warunku w postaci funkcji falowej cząstki w danym momencie, aby powiedzieć jej, czym jest to, co ewoluuje. Kluczowa różnica w stosunku do mechaniki klasycznej Newtona i Einsteina polega na tym, że prawa teorii kwantowej przewidują jedynie prawdopodobieństwo tego, jak sytuacja będzie wyglądać w późniejszym momencie, ale nie dają żadnych pewnych wyników. Dualistyczna natura podstawowych ram przewidywania nie ulega jednak zmianie.

Tak więc, skoro są to fale prawdopodobieństwa, wiedzę na temat funkcji falowych możemy zbierać tylko pośrednio. Fale kwantowe Schrödingera opisują świat na pewnym poziomie preegzystencji. Zanim zmierzymy położenie cząstki, nie ma sensu nawet pytać, gdzie się znajduje. Nie ma ona określonej pozycji, lecz jedynie potencjalne położenia opisane falą prawdopodobieństwa tego, że cząstka w przypadku dokonania na niej pomiaru zostanie znaleziona w tym lub innym miejscu. To tak, jakbyśmy zmuszali cząstki do przyjęcia określonej pozycji za pomocą patrzenia na nie, jak gdyby namacalna fizyczna rzeczywistość istniała tylko w takim zakresie, w jakim wchodzimy z nią w kontakt poprzez obserwacje i eksperymenty. „Bez pytań nie ma odpowiedzi!” — powiedział kiedyś Wheeler.

Słynny eksperyment z podwójną szczeliną stanowi żywą ilustrację tej mglistej falowej natury świata kwantowego. Jego konfiguracja, pokazana na ilustracji 20, składa się z działa wystrzeliwującego elektrony w kierunku bariery zawierającej dwie wąskie równoległe szczeliny i ekranu umieszczonego za barierą, na którym rejestrowane są miejsca uderzenia elektronów w postaci słabych błysków. Załóżmy, że kalibrujemy dział tak, aby wystrzeliwało tylko jeden elektron na raz, na przykład co kilka sekund.

Następnie sprawdzamy, że każdy elektron przechodzący przez barierę dociera do określonego miejsca na ekranie, tworząc mały rozbłysk. Tak więc pojedyncze elektrony się nie rozmywają. Taka jest korpuskularna natura elektronu — jak dotąd żadnych niespodzianek. Jeśli jednak pozwolimy eksperymentowi potrwać dłużej, rejestrując dane na temat miejsca uderzeń wielu elektronów, to na ekranie stopniowo pojawia się wzór interferencyjny, składający się z wielu jasnych i ciemnych pasków przypominających nakładające się fragmenty fal (zob. il. 20). Podobne prążki interferencyjne zaobserwowano w eksperymentach z podwójną szczeliną wykorzystujących inne cząstki elementarne, kwanty światła, atomy, a nawet molekuly.

Te wzory interferencyjne wskazują, że z pojedynczymi cząstkami związana jest pewna głęboko falowa właściwość mająca wiedzę o obu szczelinach. Jest to coś, z czego korzysta funkcja falowa cząstki. Opisując elektrony nie jako poruszające się cząstki, ale w postaci rozchodzących się fal prawdopodobieństwa, równanie Schrödingera przewiduje, że podobnie jak nakładające się na siebie fale jeziora, fragmenty funkcji falowej elektronu wychodzące z obu szczelin interferują i przeplatają się, tworząc wzór dużych i małych wartości odpowiadający wysokiemu i niskiemu prawdopodobieństwu miejsca pojawienia się każdego poszczególnego elektronu. Tam, gdzie fragmenty fali wychodzące z obu szczelin dotrą zgodnie w fazie, wzmocnią się; tam, gdzie się nie zjedną razem, ulegną osłabieniu. Kiedy następuje emisja kolejnych cząstek, ich wszystkie miejsca pojawienia się na ekranie są zgodne z profilem probabilistycznym zakodowanym w funkcji falowej każdej pojedynczej cząstki, tworząc w ten sposób obserwowany wzór interferencji. To właśnie na tym głębszym poziomie swej fali prawdopodobieństwa każda pojedyncza cząstka ma wiedzę o obu szczelinach.



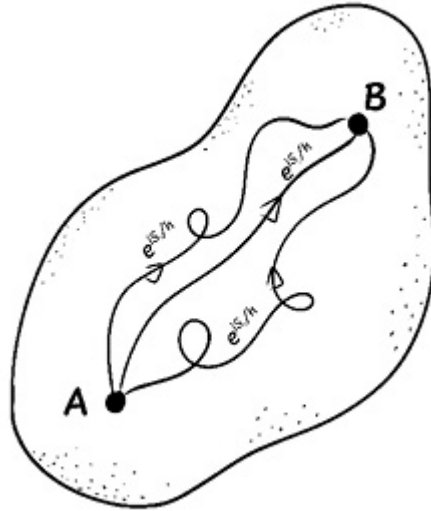
II. 20. Słynny eksperyment z podwójną szczeliną — po raz pierwszy przeprowadzony z elektronami w 1927 roku w laboratoriach firmy Bell — wykazał, że elektrony mają właściwości falowe. Mechanika kwantowa wyjaśnia wzór interferencyjny na ekranie, opisując każdy pojedynczy elektron w postaci rozchodzącej się funkcji falowej, która ulega rozdzieleniu na szczelinach pośrodku, rozprzestrzenia się i splata ze sobą po drugiej stronie, tworząc wzór dużych i małych wartości odpowiadających wysokiemu i niskiemu prawdopodobieństwu trafienia elektronu w dane miejsce na ekranie.

Przewidywania probabilistyczne teorii kwantowej zgadzają się ze wszystkimi przeprowadzonymi do tej pory eksperymentami. Ale jej zasady naruszają zdrowy rozsądek. Kwantowy opis cząstek jako abstrakcyjnych, falowych superpozycji wzajemnie ze sobą sprzecznych rzeczywistości nie pasuje do naszego codziennego doświadczania obiektów znajdujących się w określonym miejscu. Oczywiście (czasami) niepokoiło to pionierów teorii kwantowej. Mówiąc słowami Erwina Schrödingera, wszechświat kwantowy „nie jest nawet pojmowalny rozumowo”, ponieważ „każdy sposób myślenia o nim jest

błądny; może nie tak bezsensowny jak trójkątny okrąg, ale dużo bardziej niż skrzydlaty lew”¹⁰.

Dwie dekady później problem ten niepokoił również Richarda Feynmana. Feynman, student wizjonera Wheelera, stał się jednym z najbardziej wpływowych fizyków XX wieku, wnosząc duży wkład w fizykę cząstek elementarnych, teorię względności i informatykę. Zyskał światową sławę dzięki prezydenckiej Komisji Rogersa badającej katastrofę Challengera, kiedy podczas telewizyjnego przesłuchania zademonstrował awarię pierścieni uszczelniających promu. Później sformułował wyraźne ostrzeżenie w raporcie komisji, które brzmiało w następujący sposób: „Aby technologia odniosła sukces, rzeczywistość musi mieć pierwszeństwo nad oczekiwaniami opinii publicznej, bo natury nie da się oszukać”.

Jeśli Wheeler był marzycielem, to Feynman był człowiekiem czynu. Wheeler spoglądał w odległą przeszłość i odległą przyszłość, ku podwalinom fizycznej rzeczywistości i fundamentalnemu charakterowi badań naukowych. Feynman starał się, aby fizyka działała tu i teraz, głosząc, że interesuje go tylko i wyłącznie próba znalezienia zestawu reguł dostarczających przewidywań, które można zweryfikować eksperymentalnie, i niewykraczania zbyt daleko poza to¹¹. W tym duchu pod koniec lat czterdziestych Feynman postanowił opracować bardziej intuicyjny i praktyczny sposób myślenia o cząstkach kwantowych i ich funkcjach falowych. Jego pomysł polegał na wyobrażeniu sobie, że cząstki są swego rodzaju zlokalizowanymi obiektami, ale poruszają się wszystkimi możliwymi ścieżkami podczas przemieszczania się z jednego punktu do drugiego (zob. il. 21). Mechanika klasyczna zakłada, że obiekty podążają pojedynczym torem przez czasoprzestrzeń. W konsekwencji układ klasyczny ma wyjątkową i dobrze określoną historię. Feynman uważał, że mechanika kwantowa przyjmuje bardziej szerokie spojrzenie na historię, i twierdził, że wszystkie możliwe ścieżki są obierane jednocześnie, choć niektóre mogą być bardziej prawdopodobne niż inne.



II. 21. Klasyczna mechanika Newtona wymaga, żeby cząstki podążały pojedynczą ścieżką między dwoma punktami A i B w czasoprzestrzeni. Mechanika kwantowa powiada, że cząstka porusza się wszystkimi możliwymi ścieżkami. Teoria kwantowa przewiduje, że dane jest jedynie prawdopodobieństwo dotarcia do punktu B, stanowiące średnią ważoną ze wszystkich ścieżek tam prowadzących.

Na przykład Feynman rozumiał eksperyment z dwiema szczelinami w taki sposób, że poszczególne elektrony podążają nie jedną, lecz każdą możliwą ścieżką od źródła do ekranu. Jedna ścieżka prowadzi elektron przez lewą szczelinę, inna przez prawą, a jeszcze kolejna może poprowadzić elektron najpierw przez prawą, z powrotem przez lewą, zawrócić i jeszcze raz przejść przez lewą szczelinę. Według Feynmana należy rozważyć każdą możliwą trajektorię — lub historię — elektronu, bez względu jej absurdalność, a wszystkie te ścieżki dają wkład do tego, co widzimy na ekranie. Feynmanowski opis ruchu elektronu przypomina w pewnym stopniu alternatywne propozycje tras w urządzeniu GPS, z wyjątkiem bardzo niezwykłego — i głęboko kwantowego — zjawiska, że w przeciwieństwie do większości przejazdów taksówką elektrony poruszają się wszystkimi trasami i w ten sposób nieoznaczoność kwantowa wkracza w ten schemat. Jak to ujął

Feynman: „Elektron robi wszystko, co mu się podoba. Po prostu podąża w dowolnym kierunku z dowolną prędkością, do przodu lub do tyłu w czasie, jak mu wygodnie, a następnie dodajemy amplitudy [jego ścieżek] i otrzymujemy funkcję falową”¹².

Aby przewidzieć prawdopodobieństwo znalezienia elektronu w określonym punkcie na ekranie, Feynman przypisał każdej ścieżce liczbę zespoloną, która określała jej wkład do prawdopodobieństwa, a także sposób, w jaki interferowała z pobliskimi ścieżkami. Ta liczba obdarzała każdą pojedynczą ścieżkę matematycznymi właściwościami fragmentu fali. Następnie napisał piękne równanie — alternatywę dla wzoru Schrödingera — które tworzy funkcję falową cząstki poprzez zsumowanie wszystkich ścieżek kończących się w każdym punkcie. Charakterystyczny wzór interferencyjny na ekranie pojawia się wówczas z przeplatania wielu trajektorii w sumie Feynmana wyłaniających się z obu szczelin. Z matematycznego punktu widzenia dzieje się tak, ponieważ liczba zespolona przypisana każdej ścieżce w tej sumie oznacza, że różne ścieżki mogą się wzajemnie wzmacniać lub osłabiać, tak jak to się dzieje w przypadku fragmentów fal.



II. 22. Richard Feynman (po prawej) rozmawia z Paulem Dirakiem na Konferencji Teorii Względności, która odbyła się w Warszawie w 1962 roku.

Feynmanowski opis sytuacji z dwiema szczelinami pokazuje, że z obserwacji na ekranie nie można się dowiedzieć, przez którą szczelinę elektron faktycznie przeszedł. Nie powinno to dziwić. Mając nie jedną, lecz wiele rozgrywających się historii, mechanika kwantowa w oczywisty sposób ogranicza to, co możemy powiedzieć o przeszłości. Przeszłość kwantowa jest z natury rozmyta. Nie jest to wyraźna i konkretna historia, którą zwykle kojarzymy z przeszłością¹³.

Co ciekawe, schemat **sumy po historiach** Feynmana dostarcza w pełni realnego i precyzyjnego sposobu myślenia o teorii kwantowej w ogólności. Słusznie stał się znany jako sformułowanie **wielu historii** teorii kwantowej. Dla Feynmana świat przypomina nieco średniowieczny flamandzki gobelin — tkaninę krzyżujących się ścieżek, które tworzą spójny obraz rzeczywistości z wątków niezliczonych możliwości.

Stephen był pełen podziwu zarówno dla samego Feynmana, jak i dla jego podejścia do fizyki kwantowej uwzględniającego sumy po historiach. Obaj spotykali się w latach siedemdziesiątych podczas wizyt Stephena w Caltechu. „Charakterny facet — powiedział mi kiedyś — ale znakomity fizyk”.

Program Feynmana okazał się kluczowym krokiem dla fizyków, aby zaczęli stosować mechanikę kwantową poza jej pierwotnym królestwem subatomowego świata. Jego podejście pokazało, że wbrew pozorom nie musi istnieć fundamentalna sprzeczność między mechaniką klasyczną a kwantową. Wynika to stąd, że schemat sumy po historiach ma zastosowanie zarówno do małych, jak i dużych obiektów, ale przy większych przedmiotach jedynymi trajektoriami z jakimkolwiek znaczącym prawdopodobieństwem są te leżące na całej długości wzdłuż pojedynczej ścieżki przewidzianej przez klasyczne zasady dynamiki Newtona. Nie ma więc tak naprawdę zasadniczej dychotomii między światem mikro i makro. Po prostu dla obiektów makroskopowych mikroskopijne fluktuacje uśredniają się do czegoś określonego i deterministycznego, i to coś jest ścieżką klasycznego ruchu. Oznacza to, że klasyczny determinizm **wyłania się** ze zbiorowego zachowania losowych mikroskopowych historii kwantowych. Natomiast zanurzenie się w mikroskopowym królestwie powoduje, że coraz więcej przypadkowych krzyżujących się ścieżek staje się istotnych.

Wszystkie te wnioski — i zdumiewające sukcesy teorii kwantowej — oznaczały, że klasyczny światopogląd stopniowo zanikał. Wielu fizyków zaczęło wierzyć, że teoria kwantów, która powstała jako teoria cząstek subatomowych, ma zastosowanie do wszystkich obiektów we wszystkich skalach. W latach sześćdziesiątych Wheeler i jego zespół zaczęli wyobrażać sobie nawet czasoprzestrzeń jako pianę kwantową kipiącą bulgoczącymi wszechświatami niemowlęcymi i spontanicznie powstającymi i znikającymi tunelami czasoprzestrzennymi, w pewien sposób uśredniającą się w skali makroskopowej do określonej struktury ogólnej teorii względności.

Stephen również wprowadził schemat sum po historiach Feynmana do

królestwa grawitacji. Został wdrożony w tę metodę przez Jima Hartle'a, który nauczył się jej od samego Feynmana podczas studiów na Caltechu, będącym elitą ówczesnych szkół wyższych. Jim chodził na zajęcia prowadzone przez Feynmana, asystując mu przy prezentacji wykładów — między innymi przy słynnym pokazie z kulą do kręgli — i redagowaniu Feynmanowskich *Wykładów z fizyki*, najsłynniejszego podręcznika do fizyki wszech czasów, błyskotliwie prezentującego szeroki zakres zagadnień, choć rzadko rekomendowanego.

W 1976 roku Jim i Stephen byli w stanie opisać promieniowanie Hawkinga z czarnych dziur w postaci cząstek wyciekających poza horyzont, sumując *à la* Feynman wszystkie możliwe trajektorie cząstek mogące służyć do ucieczki z czarnej dziury¹⁴. Zachęteni tym wynikiem zwrócili uwagę na bardziej wymagającą i problematyczną osobliwość związaną z Wielkim Wybuchem — kosmiczny odpowiednik punktu A na ilustracji 21.

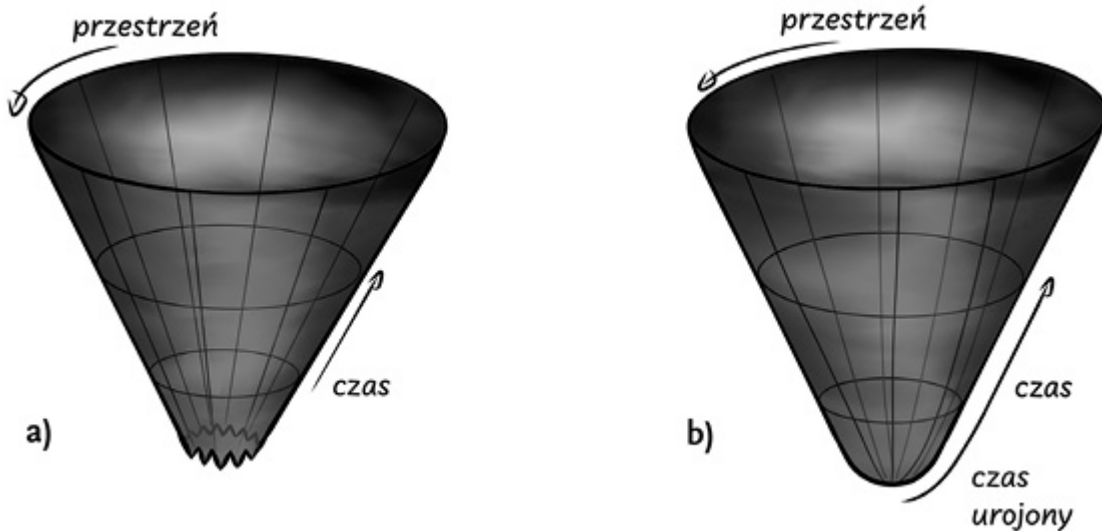
W przypadku cząstki nieoznaczoność kwantowa oznacza, że wartości jej położenia i prędkości są nieco nieprecyzyjne. Zatem zastosowana do czasoprzestrzeni kwantowa nieoznaczoność powinna oznaczać, że przestrzeń i czas są lekko rozmyte, ponieważ oscylacje kwantowe rozmazują punkty w przestrzeni i momenty w czasie. Niemal w całym obserwowanym wszechświecie takie rozmycie czasoprzestrzeni jest zupełnie nieistotne, ale w najwcześniejszych chwilach wszechświata, gdy gęstość materii i krzywizna czasoprzestrzeni rosły bez ograniczeń, nieoznaczoność kwantowa mogła odgrywać bardzo ważną rolę. Rozumując w ten sposób, Stephen wyobrażał sobie, że we wczesnym wszechświecie efekty kwantowe zatarłyby nawet różnicę między przestrzenią a czasem, wywołując u nich coś na kształt kryzysu tożsamości, gdy przedziały czasu zachowywały się niekiedy jak odległości przestrzenne i odwrotnie. Co więcej, Jim i Stephen odważnie zaproponowali, że Feynmanowską sumę po tym całym szalonym rozmyciu czasoprzestrzeni da się wykonać, a wypadkową funkcję falową można będzie wyrazić w elegancki geometryczny sposób.

Aby poznać koncepcję ich **funkcji falowej wszechświata**, spójrzmy na ilustrację 23. Jest to to samo schematyczne przedstawienie jednowymiarowego wszechświata w kształcie okręgu, które pokazałem na ilustracji 14 w rozdziale 2, ale tym razem odtworzyłem film o rozszerzającym się wszechświecie do tyłu w czasie. Ilustracja 23a przypomina nam, co się stanie, jeśli ślepo zaufamy klasycznej teorii względności Einsteina: przestrzeń kurczy się w przeszłości i pewnym momencie zanika w osobliwości o nieskończonym zakrzywieniu i krzywiźnie, pociągając za sobą czas.

Ale Jim i Stephen uważali, że tak się nie stanie. Ich zdaniem efekty kwantowomechaniczne radykalnie zmieniają tę ewolucję, kiedy cofniemy wskazówki zegara tak daleko. W istocie przewidywali, że rozmycie przestrzeni i czasu w praktyce obróci pionowy kierunek czasu w dodatkowy poziomy kierunek przestrzenny. Pozwoliło to na pojawienie się całkowicie nowej możliwości dla początku wszechświata: te dwa wymiary przestrzeni mogły się połączyć i wytworzyć gładką dwuwymiarową kulistą powierzchnię, przypominającą nieco powierzchnię Ziemi. Ilustracja 23b przedstawia tę kwantową ewolucję. Widzimy, że osobliwość na dnie klasycznego wszechświata — owo zdarzenie bez przyczyny, które pozornie umieszcza początek kosmosu poza granicami nauki — zostaje tu zastąpiona przez gładki i zaokrąglony początek kwantowy, w każdym miejscu zgodny z prawami fizyki.

Był to niezwykle oryginalny pomysł. Sedno propozycji Jima i Stephena polegało na tym, że rozszerzający się wszechświat nie ma osobliwości w przeszłości, ponieważ wymiar czasowy znika w rozmyciu kwantowym w trakcie drogi powrotnej ku początkowi. U podstawy miski na ilustracji 23b czas staje się przestrzenią. Pytanie o to, co było wcześniej, nie ma wtedy sensu, ponieważ nie istnieje już pojęcie czasu, do którego można by się odnieść. „Pytanie o to, co wydarzyło się przed Wielkim Wybuchem, brzmiałoby jak pytanie, co leży na południe od bieguna południowego” —

podsumował tę teorię Hawking, a następnie nazwał ich kosmogenezę kwantową postulatem **braku brzegów**¹⁵.



II. 23. Klasyczna i kwantowa ewolucja rozszerzającego się wszechświata przedstawionego tu jako jednowymiarowy okrąg; (a): w klasycznej teorii grawitacji Einsteina wszechświat ma początek w osobliwości, u dołu, gdzie krzywizna staje się nieskończona, a prawa fizyczne załamują się; (b): w kwantowej teorii Hartle'a i Hawkinga osobliwość zostaje zastąpiona gładkim i zaokrąglonym kształtem przypominającym czaszę, w każdym miejscu zgodnym z prawami fizyki.

Hipoteza braku brzegów Stephena łączy ze sobą dwie pozornie sprzeczne właściwości. Z jednej strony, przeszłość byłaby skończona — czas nie cofa się w nieskończoność. Z drugiej zaś, nie miałyby też początku, pierwszej chwili, w której zaczyna płynąć czas. Gdybyśmy byli mrówkami pełzającymi po powierzchni na ilustracji 23b i szukającymi początku wszechświata, nie znaleźlibyśmy go. Sferyczna podstawa czaszy odpowiada ograniczeniu czasu w przeszłości, ale nie określa momentu stworzenia. Jakakolwiek próba ustalenia rzeczywistego początku w teorii braku brzegów jest daremna — zagubiona w kwantowej nieoznaczoności.

Z estetycznego punktu widzenia jest coś pociągającego w sposobie, w jaki hipoteza braku brzegów omija zagadkę początku czasu. Czasza na dnie

czasoprzestrzeni w tej teorii przypomina geometryczną wersję pierwotnego atomu Lemaître'a. Zgodnie z sugestią Hamleta, który wypowiedział słowa: „Zamknięty w skorupce orzecha, jeszcze czułbym się władcą nieskończonych przestrzeni”¹⁶, Hawking wyobrażał sobie nowo narodzony wszechświat jako skorupkę orzecha w swej dłoni.

Kiedy Jim i Stephen przesłali w lipcu 1983 roku swój artykuł *Funkcja falowa wszechświata* do publikacji w czasopiśmie „Physical Review”, sprawy nie potoczyły się gładko. Pierwszy recenzent sugerował odrzucić pracę ze względu na fakt, że autorzy zastosowali skandaliczną ekstrapolację Feynmanowskiego sformułowania sumy po historiach w teorii kwantowej do całego wszechświata. Jim i Stephen poprosili wówczas o kolejną opinię. Drugi recenzent stwierdził, że zgadza się z pierwszym, iż ekstrapolacja zaprezentowana przez autorów jest rzeczywiście bulwersująca. Mimo to, kontynuował, artykuł powinien zostać opublikowany, „ponieważ będzie to praca przełomowa”¹⁷. I tak też się stało. Po pięćdziesięciu latach od manifestu Lemaître'a z 1931 roku, w którym wezwał do kwantowego spojrzenia na pochodzenie czasu, rewolucyjne odkrycie Jima i Stephena przekuło jego śmiałą wizję w prawdziwą hipotezę naukową. Ich funkcja falowa wszechświata wywołała falę zainteresowania kwantowymi podstawami teorii kosmologicznej, która stanie się kluczem w poszukiwaniu przez fizyków rozwiązania zagadki projektu.

W istocie hipoteza braku brzegów wyniknęła z zupełnie nowego podejścia do badania kwantowej natury grawitacji, którego Stephen był pionierem w latach siedemdziesiątych, pracując z pierwszym pokoleniem swoich studentów. Podejście zespołu z Cambridge do grawitacji kwantowej opierało się na użyciu geometrycznego języka Einsteina, ale, o dziwo, używało zakrzywionych kształtów czterech wymiarów przestrzennych bez kierunku czasowego zamiast wygiętych czasoprzestrzeni relatywistycznych.

W klasycznej teorii względności Einsteina przestrzeń to przestrzeń, a czas

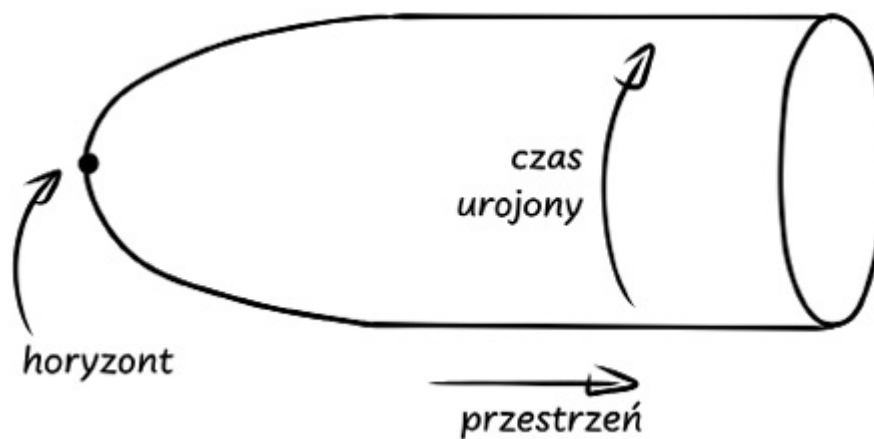
to czas. Oczywiście przestrzeń i czas są połączone w czterowymiarową czasoprzestrzeń, jak wyraźnie pokazują załączone przeze mnie wykresy, od pustej czasoprzestrzeni Minkowskiego po geometrię czarnej dziury Penrose'a. Ale na wszystkich tych wykresach łatwo jest odróżnić przestrzeń od czasu: strzałka czasu skierowana jest zawsze w obrębie stożka świetlnego przyszłości, podczas gdy kierunki przestrzenne nie (zob. na przykład il. 8). Tymczasem Stephen wyobraził sobie, że zakrzywione geometrie o czterech wymiarach przestrzennych obejmują głębokie kwantowe właściwości grawitacji. W wyniku tego jego praca stała się znana jako „podejście euklidesowe do grawitacji kwantowej” od imienia starożytnego greckiego matematyka Euklidesa, który jako pierwszy w systematyczny sposób badał geometrię wymiarów przestrzennych.

Mówiąc geometrycznie, przekształcenie czasu w przestrzeń sprowadza się do obrotu kierunku czasu o 90 stopni. Widać to wyraźnie na panelu kwantowym (zob. il. 23), gdzie „na początku”, na dnie czaszy, czas zaczyna „płynąć” w płaszczyźnie poziomej, podobnie jak kołowy wymiar przestrzeni. Ta przemiana czasu w przestrzeń jest często opisywana jako przejście do czasu urojonego, ponieważ z matematycznego punktu widzenia obrót odpowiada pomnożeniu czasu przez liczbę urojoną, czyli pierwiastek kwadratowy z minus jeden. Oczywiście ta operacja unieważnia wszelkie pojęcie normalnej ewolucji. Nie miałyby absolutnie żadnego sensu ustawianie budzika na $7\sqrt{-1}$ rano, żeby złapać poranny pociąg. Nawet proces tak powolny jak Brexit rozgrywał się w czasie rzeczywistym. „Każda subiektywna koncepcja czasu związana ze świadomością lub zdolnością dokonywania pomiarów przestałaby mieć rację bytu” — oświadczył Stephen. Ale poprzez mocniejsze zaginanie zakrzywionych geometrii Einsteina niż ktokolwiek inny, przechodząc od czasu rzeczywistego do urojonego, znalazł fascynującą nowatorską drogę do kwantowego królestwa grawitacji.

Weźmy pod uwagę czarną dziurę. Rysunek Penrose'a czarnej dziury (zob. il. 11 w rozdziale 2) przedstawia geometrię klasycznej czarnej dziury

istniejącej w czasie rzeczywistym. Geometria kwantowej czarnej dziury w czasie urojonym ma zupełnie inny kształt. Przypomina bardziej powierzchnię cygara przedstawioną na ilustracji 24. Posuwanie się „do przodu” w czasie urojonym w tej geometrii czarnej dziury odpowiada poruszaniu się po okręgu. Czubek cygara odpowiada horyzontowi czarnej dziury. Nic nie leży poza nim, na lewo od niego na ilustracji 24, więc w przeciwieństwie do czarnej dziury w czasie rzeczywistym jej euklidesowy odpowiednik nie ma osobliwości tam, gdzie teoria się załamuje. Podobnie jak postulat braku brzegów zastępuje pierwotną osobliwość klasycznego wszechświata zaokrąglonym początkiem kwantowym, euklidesowy opis czarnej dziury ma gładką i regularną geometrię, która wszędzie jest zgodna z (kwantowymi!) prawami fizyki. Pracując z euklidesowymi kształtami czarnych dziur, Stephen i jego grupa z Cambridge byli w stanie zrozumieć głębokie powody, dla których czarne dziury nie są całkowicie czarne, ale wypromieniowują cząstki kwantowe podobnie jak zwykłe ciała o określonej temperaturze¹⁸.

Zdolność geometrii euklidesowych do opisu kwantowych właściwości grawitacji wywarła na Stephenie bardzo mocne wrażenie. Metoda czasu urojonego stała się kamieniem węgielnym jego wysiłków zmierzających do połączenia zasad grawitacji i teorii kwantowej w celu odkrycia tajemnic Wielkiego Wybuchu. „Można przyjąć stanowisko, że grawitacja kwantowa, a właściwie cała fizyka, jest naprawdę zdefiniowana w czasie urojonym” — oświadczył w pewnym momencie. „Jest to tylko konsekwencją naszego postrzegania, że interpretujemy wszechświat w czasie rzeczywistym”¹⁹.



II. 24. Czarne dziury mają kształt cygara, gdy rozważa się je w czasie urojonym. Horyzont czarnej dziury odpowiada czubkowi cygara po lewej stronie. Geometryczna gładkość czubka wiąże się z wielkością kołowego wymiaru w czasie urojonym po prawej stronie. Ten ostatni z kolei określa temperaturę czarnej dziury i natężenie promieniowania Hawkinga wydostającego się z niej w czasie rzeczywistym.

W zwykłej mechanice kwantowej pozbawionej grawitacji zamiana czasu w przestrzeń jest standardową sztuczką, którą fizycy stosują do obliczania sum Feynmana po historii cząstek. Dzieje się tak, ponieważ dodawanie do siebie ścieżek w czasie urojonym upraszcza skomplikowaną sumę Feynmana. Pod koniec obliczeń fizycy obracają jeden z wymiarów przestrzennych z powrotem do czasu rzeczywistego i odczytują wynikające z tego prawdopodobieństwo, że cząstka zrobi to lub tamto. Ale Jim i Stephen nie chcieli wykonywać obrotu z powrotem do czasu rzeczywistego. Śmiałość postulatu braku brzegów polegała na tym, że jeśli chodzi o początek wszechświata, transformacja czasu w przestrzeń nie jest wyłącznie sprytną sztuczką obliczeniową, lecz kwestią o fundamentalnym znaczeniu. Ta teoria mówi nam, że historia wszechświata wygląda tak: dawno, dawno temu nie było czasu.

W koncepcji braku brzegów można dostrzec coś einsteinowskiego. W 1917 roku, kiedy Einstein przecierał szlaki kosmologii relatywistycznej, nie miał pojęcia, jakie warunki brzegowe powinien przyjąć na przestrzennej krawędzi

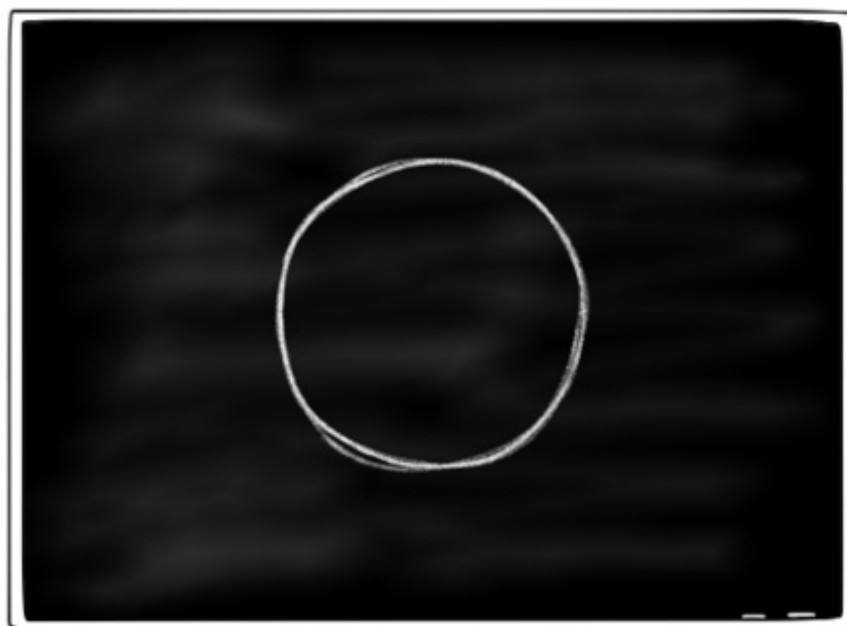
wszecłwiata. Doszedł do wniosku, że byłoby o wiele łatwiej, gdyby przestrzeń nie miała brzegów. W ten sposób doprowadził do obrazu naszego wszechświata przestrzennego jako gigantycznej trójwymiarowej hipersfery, która, podobnie jak dwuwymiarowa powierzchnia zwykłej sfery, nie ma krawędzi ani brzegów. W swojej hipotezie braku brzegów Stephen i Jim rozwiązali problem warunków brzegowych w chwili zero czasu w podobnie einsteinowski sposób, całkowicie eliminując początkowy brzeg.

Godne uwagi jest to, że Stephen rozwinął swoje geometryczne podejście do grawitacji kwantowej w okresie, gdy tracił możliwość pisania równań własnymi rękami. Ta strata mogła zachęcić go do podjęcia próby przełożenia niezgłębionej kwantowej sfery grawitacji na język geometrii i topologii, który mógł przedstawiać na tablicy i do pewnego stopnia manipulować nim w swojej głowie.

Wizualizacja była w istocie centralnym punktem rozumowania Stephena. Praca z nim oznaczała zajmowanie się kształtami i obrazami w celu przedstawienia fizycznej istoty relacji matematycznych. Na bardzo wczesnym etapie naszej współpracy zasmakowałem w sposobie, w jaki radził sobie z obliczeniami bez możliwości pisania równań, kiedy odwiedziłem go pewnego razu w szpitalu, gdzie dochodził do siebie po operacji ratującej mu życie. Rozmawialiśmy przez chwilę o gehennie, przez którą dopiero co przeszedł, ale potem Stephen spytał, czy nie poszukałbym mu w szpitalu tablicy. Kiedy ją w końcu znalazłem, poprosił mnie o narysowanie okręgu. Pod koniec popołudnia okrąg reprezentował krawędź dysku, który otrzymujemy, gdy rzutujemy ekspandującą ewolucję kwantową na płaszczyznę (zob. il. 23b). Początek wszechświata znajduje się w środku dysku, a dzisiejszy wszechświat odpowiada okręgowi. Wszystko to oczywiście dzieje się w czasie urojonym.

Euklidesowe podejście do grawitacji kwantowej doprowadziło Stephena do wniosków, których nie dałoby się praktycznie uzyskać w inny sposób. Hipoteza braku brzegów jest chyba najbardziej uderzającym tego przykładem.

Ale zamiana czasu w przestrzeń stanowiąca samo sedno tej koncepcji oznaczała również, że bardzo trudno było zrozumieć, co naprawdę działo się na początku wszechświata. Czas na dnie czasoprzestrzeni oznacza, że powinniśmy porzucić naturalną dla nas koncepcję, że zawsze był jakiś czas nadający znaczenie temu, co przed i po. Ale zadziwiająco niewiele mówi — jeśli w ogóle cokolwiek — o tym, co faktycznie może się dziać pod nieobecność czasu, albo jaki rodzaj mikroskopijnego sumarycznego kwantowego rozmycia w największym stopniu tworzy geometrię czaszy. To tak, jakby próbowała nam powiedzieć, że nie powinniśmy zadawać tego typu trudnych pytań.



II. 25. Ewolucja rozszerzającego się wszechświata w czasie urojonym.

Tak więc fizycy narzekali, że twórcze wykorzystanie geometrii euklidesowych przez Stephena przypominało magię. Całe jego podejście było często odrzucane jako kuriozum z Cambridge. Dlaczego czas miałby się zachowywać w tak dziwny sposób? Problem ten częściowo wynikał stąd, że ramy euklidesowe nie są pełnoprawną kwantową teorią grawitacji, ale półklasycznym połączeniem elementów klasycznych i kwantowych

pozbawionym jasnych reguł matematycznych. Stephen i jego studenci wymyślali zasady na bieżąco. Jak to ujął teoretyk z Harvardu, Sidney Coleman, po podjęciu własnej próby uzasadnienia na podstawie podejścia euklidesowego, że stała kosmologiczna powinna wynosić zero: „Euklidesowe sformułowanie grawitacji nie jest dziedziną o solidnych podstawach i jasnych zasadach postępowania; w istocie bardziej przypomina bagno na bezdrożu. Mam wrażenie, że udało mi się przez nie przejść bezpiecznie, ale zawsze jest możliwe, że nie zdając sobie z tego sprawy, pozostaję zanurzony po szyję w ruchomych piaskach i szybko tonę”²⁰.

Stephen pozostał jednak niezrażony. „Wolę rację niż ścisłość” — odpowiadał na tego typu zarzuty. Miał bardzo silne przeczucie, że geometrie euklidesowe zapewnią wyjątkowo szeroką bramę do najbardziej ekstremalnych obszarów wszechświata — do czarnych dziur i Wielkiego Wybuchu. Dziś — prawie czterdzieści lat od jego pionierskich prac nad kosmologią kwantową — hipoteza braku brzegów nadal budzi wielkie zainteresowanie, problemy i emocje, ale jak dotąd nie zaoferowała realnego alternatywnego opisu początku wszechświata.

W ramach działania, które wyglądało na zamierzone uzyskanie rozgłosu, Stephen po raz pierwszy przedstawił propozycję modelu wszechświata bez brzegów i bez momentu stworzenia na spotkaniu w Papieskiej Akademii Nauk w Watykanie w październiku 1981 roku. Oficjalnym celem Akademii jest doradzanie Watykanowi w kwestiach naukowych oraz wzmacnianie dialogu między nauką a religią. W tym celu Akademia zaprosiła naukowców z całego świata do malowniczego domku Piusa IV — mieszczącego się pośrodku ogrodów botanicznych znajdujących się za bazyliką św. Piotra — na tygodniową dyskusję na temat kosmologii i fizyki fundamentalnej²¹. Ale Wielki Wybuch okazał się delikatną kwestią. Na początku tygodnia papież Jan Paweł II oznajmił zebranych naukowcom: „Każda hipoteza naukowa na temat pochodzenia świata, taka jak pierwotnego atomu będącego źródłem całego

fizycznego wszechświata, pozostawia otwartą kwestię początku wszechświata. Nauka sama w sobie nie może rozwiązać tego problemu. Wymaga wiedzy wykraczającej poza fizykę i astrofizykę, czyli czegoś, co zwiemy metafizyką. Przede wszystkim potrzebuje wiedzy, która pochodzi z objawienia Bożego”²². Jakby odpowiadając na orędzie papieża, Stephen w swoim zadziwiającym wykładzie *Warunki brzegowe wszechświata* przedstawił odważną koncepcję, że być może nie było początku. „Powinno być coś bardzo szczególnego w warunkach brzegowych wszechświata, a cóż może być bardziej szczególnego niż warunek, że nie ma brzegu” — oświadczył, wprawiając słuchaczy w osłupienie.

Funkcja falowa wszechświata pozbawionego brzegów, która stąd wyrosła, była — i w istocie nadal jest — prawem fizycznym całkowicie nowego typu. Nie jest to ani prawo dynamiki, ani warunek brzegowy, ale połączenie ich obu, ucieleśniające nowy rodzaj fizyki. Wcześniej wspomniałem, że fizyka klasyczna i zwykła mechanika kwantowa cząstek wpisują się w tradycyjną dualistyczną strukturę dokonywania przewidywań, która oddziela prawa od warunków początkowych. Nie dotyczy to kosmologii braku brzegów odrzucającej tę dychotomię na rzecz bardziej ogólnej struktury, która na równych zasadach traktuje warunki początkowe i dynamikę. Zgodnie z hipotezą braku brzegów wszechświat nie ma w zasadzie jakiegoś punktu A, w którym należałoby określić warunki zewnętrzne.

Prawdę powiedziawszy, coś takiego powstawało już od dawna. W swoim wykładzie wygłoszonym w Edynburgu w 1939 roku Paul Dirac przewidział koniec dualizmu w fizyce. „Rozdźwięk [między prawami i warunkami początkowymi] jest z filozoficznego punktu widzenia tak niezadowolający, gdyż jest sprzeczny z wszelkimi koncepcjami jedności natury, iż moim zdaniem można bezpiecznie przewidzieć, że zniknie on w przyszłości, mimo że doprowadzi nas to do zaskakujących zmian w przyjętych przez nas koncepcjach”. Cztery dekady później postulat braku brzegów właśnie tego dokonał.

Dzięki swej hipotezie Jim i Stephen osiągnęli to, co tak wielu wielkich myślicieli, od Kanta po Einsteina, uważało za niemożliwe. Pokonując odwieczną przepaść między ewolucją a stworzeniem, teoria ta płynnie wprowadziła wreszcie kwestię pochodzenia wszechświata do nauk przyrodniczych. Dała szansę ostatecznie rozstrzygnąć zagadkę początku wszechświata. Rysowało to oczywiście bardzo pociągającą perspektywę. Stephen naprawdę czuł, że znalazł sposób na obejście osobliwości — że rozwiązał zagadkę istnienia.

W przeciwieństwie do Lemaître'a nie powstrzymywał się od wplatania teologii do swojej kosmogonii. „Wszechświat byłby całkowicie samowystarczalny i nie podlegałby wpływowi niczego z zewnątrz” — pisał w *Krótkiej historii czasu*. „Nie zostałby ani stworzony, ani zniszczony. Po prostu byłby [...]. Jakie miejsce jest zatem dla stwórcy?” Teoria braku brzegów, argumentował Stephen, zrezygnowała z potrzeby wprowadzania *primum movens* wprawiającego wszechświat w ruch, ponieważ pokazuje, że wszechświat mógł zostać stworzony z niczego. Oczywiście „Bóg luk”, przywołany przez Stephena w *Krótkiej historii czasu*, jest daleki od *Deus absconditus* — „Boga ukrytego” Lemaître'a, ukrytego już na początku stworzenia.

Dla jasności, była to wypowiedź wczesnego Hawkinga, który pozostawał zwolennikiem metafizycznego stanowiska Einsteina. Podobnie jak Einstein, wczesny Hawking zakładał, że matematyczne prawa fizyki obdarzone są pewną formą istnienia wykraczającą poza fizyczną rzeczywistość, którą rządzą. Einstein w istocie nienawidził koncepcji Wielkiego Wybuchu w dużej części dlatego, że podważała ten ideał. Podczas gdy twierdzenie Stephena o osobliwościach wydawało się potwierdzać podejrzenia Einsteina, pozbawiona brzegów czasa, która zastąpiła osobliwość, w jakiś sposób pozwalała uchwycić początek i jednocześnie podtrzymać idealizm Einsteina. Była to naprawdę fascynująca perspektywa.

Lecz podobnie jak własna teoria względności zaskoczyła Einsteina,

hipoteza braku brzegów zaskoczyła Stephena. Ta wczesna wersja postulatu braku brzegów nie była jeszcze wystarczająco radykalna!



II. 26. Stephen Hawking z częścią swoich akademickich wychowanków na przyjęciu w King's College w Cambridge z okazji swoich sześćdziesiątych urodzin.

¹ Stephen Hawking, *My Brief History* (New York: Bantam Books, 2013), s. 29.

² Tarapaty wynikały na przykład z przeglądów źródeł radiowych, znanych później jako kwazary, które wykazały, że te źródła były na niebie rozmieszczone dość równomiernie. Oznaczało to, że prawdopodobnie znajdowały się poza naszą galaktyką. Było jednak zbyt wiele słabych źródeł, co wskazywało, że ich gęstość była wyższa w odległej przeszłości, czyli inaczej, niż można się spodziewać w niezmiennym wszechświecie stanu stacjonarnego.

³ Podobnie jak Penrose, Stephen wyznaczył punkt bez powrotu, a mianowicie powstanie powierzchni zapobiegającej uwięzieniu, z której rozchodzą się promienie światła wyemitowane we wszystkich kierunkach. Stephen wykazał, że jeśli kiedyś istniała powierzchnia zapobiegająca uwięzieniu, musiała istnieć osobliwość nieco wcześniej w czasie.

⁴ George F.R. Ellis, *Relativistic Cosmology* w: *Proceedings of the International School of*

Physics „Enrico Fermi”, Course 47: General Relativity and Cosmology, red. R.K. Sachs (New York–London: Academic Press, 1971), s. 104–182.

⁵ Cyt. za: *General Relativity and Gravitation: A Centennial Perspective*, red. A. Ashtekar, B. Berger, J. Isenberg, M. Maccallum (Cambridge: Cambridge University Press, 2015), s. 19.

⁶ Newton — notabene członek Kolegium Trójcy Świętej — odrzucił decyzję Soboru Nicejskiego, że Syn Boży jest współistotny Bogu Ojcu.

⁷ Hendrik A. Lorentz, *La théorie du rayonnement et les quanta*, w: *Proceedings of the First Solvay Council, Oct 30–Nov 3, 1911*, red. P. Langevin, M. de Broglie (Gauthier-Villars, Paris, 1912), s. 6–9.

⁸ Zasada nieoznaczoności Heisenberga idzie w parze z hipotezą kwantową Plancka. Wyobraźmy sobie, że chcemy zmierzyć położenie cząstki. Żeby tego dokonać, musimy spojrzeć na cząstkę, na przykład oświetlając ją. Aby dokładniej zmierzyć tę pozycję, możemy użyć światła o krótszej długości fali. Jednak zgodnie z hipotezą kwantową Plancka trzeba użyć przynajmniej jednego kwantu światła. Ten kwant nieco zakłóci stan cząstki, zmieniając jej prędkość w sposób, którego nie możemy przewidzieć. Im mniejsza długość fali, tym wyższa energia pojedynczego kwantu światła i tym większa wynikająca z tego nieoznaczoność prędkości cząstki. Zasada nieoznaczoności Heisenberga określa to ilościowo, stwierdzając, że nieokreśloność położenia cząstki mnożona przez nieokreśloność jej pędu nigdy nie może być mniejsza niż wielkość zwana stałą Plancka, oznaczana przez h . Wartość stałej Plancka można wyznaczyć eksperymentalnie. Jest to jedna z fundamentalnych stałych natury, obok prędkości światła c i stałej grawitacji Newtona G , które występują w równaniu Einsteina. Natomiast kwantowa stała Plancka jest w wyraźny sposób nieobecna w tym klasycznym równaniu (w przeciwieństwie do kwantowego)!

⁹ Schrödingerowski opis cząstek w kategoriach fal prawdopodobieństwa wyjaśnia również wczesne eksperymenty kwantowe z atomami. Weźmy na przykład elektron krążący wokół jądra atomowego. Jeśli uznamy elektron za obiekt falowy, to tylko dla niektórych orbit ich obwód będzie odpowiadać całkowitej liczbie długości fal elektronu. W przypadku tych orbit grzbiet fali znajdowałby się za każdym razem w tym samym położeniu po przebyciu całego jej obwodu, więc fale będą się sumować i wzmacniać nawzajem. To są właśnie skwantowane orbity Bohra.

¹⁰ Erwin Schrödinger, *Science and Humanism: Physics in Our Time* (Cambridge: Cambridge University Press, 1951), s. 25.

¹¹ W celu zapoznania się z barwnym przedstawieniem naukowych i osobistych powiązań Richarda Feynmana i Johna Wheelera gorąco polecam pozycję: Paul Halpern, *The Quantum Labyrinth* (New York: Basic Books, 2018).

¹² Freeman J. Dyson, nawiązując do Feynmana w oświadczeniu z 1980 roku, cyt. za: Nick Herbert, *Quantum Reality: Beyond the New Physics* (Garden City, N.Y.: Anchor Press, 1987).

¹³ Wyobraźmy sobie, że ktoś oszukuje, umieszczając odpowiednie urządzenie w pobliżu jednej ze szczelin, aby sprawdzić, którą ścieżką **n a p r a w d ę** podąża elektron. Z dodatkowym detektorem rzeczywiście zaobserwujemy każdy elektron przechodzący przez jedną lub drugą szczelinę. Jednak zauważymy również, że wzór interferencji na ekranie znika. Dzieje się tak dlatego, że za pomocą nowego urządzenia zadajemy inne pytanie, wybierając tym samym inny zestaw historii. Dodając nowy przyrząd, zadajemy pytanie: „Którą ścieżkę obrał elektron?”. Aby na nie odpowiedzieć, schemat sumy po historiach Feynmana nakazuje nam zsumować wszystkie ścieżki elektronów przechodzących przez daną szczelinę. Oczywiście daje to całkowite prawdopodobieństwo przejścia przez tę szczelinę, czyli 50 procent. Ale zmuszając elektron do ujawnienia tej informacji, wyeliminowaliśmy również wszystkie historie przechodzące przez drugą szczelinę, a tym samym możliwość interferencji między obydwoma zestawami trajektorii w drodze do ekranu. Wzór interferencyjny pojawia się tylko wtedy, gdy eksperymentator nie próbuje określić, przez którą szczelinę przeszedł dany elektron.

¹⁴ James B. Hartle, Stephen W. Hawking, *Path-Integral Derivation of Black-Hole Radiance*, „Physical Review” D 13 (1976), s. 2188–2203.

¹⁵ W odpowiednim czasie będzie można się więcej dowiedzieć o genezie hipotezy braku brzegów: archiwa UCSB zawierają duży niebieski segregator z napisem „81–82 Wave Function”, w którym Jim Hartle skrupulatnie prowadził korespondencję z Hawkingiem podczas tych dwóch lat.

¹⁶ William Szekspir, *Hamlet*, w przekładzie Stanisława Barańczaka (przyp. tłum.).

¹⁷ Jim Hartle, kontakt osobisty.

¹⁸ Średnica cygara określa temperaturę promieniowania Hawkinga mierzoną przez odległego obserwatora. Im większa średnica cygara, tym niższa temperatura czarnej dziury. Struktura euklidesowa określa tę średnicę, wymagając, aby geometria była gładka na czubku jak kula, a nie jak stożek. W ten sposób geometria euklidesowa czarnej dziury koduje jej zachowanie kwantowe.

¹⁹ Gary W. Gibbons, Stephen W. Hawking, red., *Euclidean Quantum Gravity* (Singapore, River Edge, N.J.: World Scientific, 1993), s. 74.

²⁰ Siney Coleman, *Why there is nothing rather than something: A theory of the cosmological constant*, „Nuclear Physics” B 310, nr 3–4 (1988), s. 643.

²¹ Tego rodzaju tematyczne spotkania dyskusyjne zostały zapoczątkowane przez prałata Lemaître’a w latach sześćdziesiątych, kiedy piastował stanowisko przewodniczącego Papieskiej Akademii Nauk.

²² Przemówienie Jego Świątobliwości Jana Pawła II, opublikowane w *Astrophysical Cosmology, Proceedings of the study week on cosmology and fundamental physics*, red. H.A. Brück, G.V. Coyne, M.S. Longair (Città del Vaticano: Pontificia Academia Scientiarum: Distributed by Specola Vaticana, 1982).

ROZDZIAŁ 4

Popiół i dym

Creía en infinitas series de tiempos, en una red creciente y vertiginosa de tiempos divergentes, convergentes y paralelos...; en algunos existe usted y no yo; en otros, yo, no usted...; en otro, yo digo estas mismas palabras, pero soy un error, un fantasma.

Wierzył, że istnieją nieskończone serie czasów, rosnąca i przerażająca sieć czasów, rozbieżnych, zbieżnych i równoległych. [...] w niektórych pan istnieje, a ja nie; w innych znów istnieję ja, pana zaś nie ma [...] w jeszcze innym wypowiadam te słowa, ale jestem tylko widmem, złudzeniem.

JORGE LUIS BORGES,
OGRÓD O ROZWIDLAJĄCYCH SIĘ ŚCIEŻKACH
(TŁUM. ANIELA GORZKOWSKA)

Szkoła względności z Cambridge pod wodzą Stephena była jak grupa rockowa: nieformalna, niemająca kontaktu z codzienną rzeczywistością i radykalnie dążąca do zmiany świata.

Jej kwatery w DAMTP, czyli na Wydziale Matematyki Stosowanej i Fizyki Teoretycznej, powstała w 1959 roku dzięki staraniom matematyka stosowanego George'a Batchelora. Początkowo DAMTP mieścił się w skrzydle słynnego Laboratorium Fizycznego Cavendisha, gdzie w 1897 roku Joseph John Thomson odkrył elektron i gdzie w 1953 roku Watson i Crick rozszyfrowali spiralną strukturę DNA¹. Następnie w 1964 roku DAMTP przeniósł się do Old Press Site naprzeciwko piekarni Fitzbillies, pomiędzy Silver Street i Mill Lane, i to tam po raz pierwszy spotkałem Stephena. Wiktoriański budynek, nierzucający się w oczy z zewnątrz, miał wewnątrz najbardziej nielogiczny plan pięter, z labiryntem słabo oświetlonych

korytarzy prowadzących do sal wykładowych, ślepych zaułków i zakurzonych gabinetów. Uwielbialiśmy to miejsce.

Bijącym sercem DAMTP była „światlica”. Wysokie sufity wsparte na kolumnach, surowe portrety byłych profesorów katedry Lucasa spoglądających ze ścian, winylowe fotele i tablica ogłoszeń pełna plakatów zapowiadających imprezy studenckie lub konferencje naukowe — to miejsce, w którym w połowie lat sześćdziesiątych Dennis Sciama wprowadził niemal obowiązkowy codzienny rytuał herbatki. Punktualnie o godzinie szesnastej włączano światła, stawiano kubki obok siebie na blacie niczym armię porcelanowych żołnierzyków i serwowano herbatę. Po chwili w sali panował ruch i gwar. W końcu fizyka teoretyczna jest głęboko towarzyskim zajęciem.

Stephen wyłaniał się zza oliwkowozielonych drzwi swojego gabinetu, prawą ręką trzymając pilota, a lewą operując drążkiem sterującym, prowadząc wózek inwalidzki przez tłum — od czasu do czasu najeżdżając na czyjąś stopę — by włączyć się do rozmowy. Dyskusje toczyły się przy niskich stolikach z białymi zmywalnymi blatami, idealnie nadającymi się do pisania równań i przekazywania sobie nowych pomysłów. Sama herbata była dość kiepska, ale przy tej okazji można było zajmować się wspaniałą nauką dzięki integrowaniu ludzi. Robert Oppenheimer, znany z prac nad bombą atomową i były dyrektor Instytutu Studiów Zaawansowanych w Princeton, powiedział kiedyś: „Herbatka to czas, kiedy wyjaśniamy sobie nawzajem to, czego nie rozumiemy”. Herbatka w DAMTP przez lata służyła właśnie temu celowi, zamieniając światlicę w międzynarodowe centrum najnowszych osiągnięć fizyki teoretycznej.

Mój własny codzienny rytuał herbatki ze Stephenem w DAMTP stworzył więź, która sięgała znacznie głębiej niż typowa relacja nauczyciel–uczeń. Często nasze dyskusje trwały długo po tym, jak światlica pustoszała, przedłużając się do wieczora albo przenosząc się do The Mill, pubu odwiedzanego po pracy przez pracowników DAMTP nad rzeką Cam, albo kontynuowaliśmy je podczas kolacji w jego domu w Wordsworth Grove. (W

tamtych czasach zwykle podawał bardzo ostre curry). Praca ze Stephenem stanowiła pakiet „wszystko w jednym”. Nie było wyraźnego podziału między jego życiem zawodowym a osobistym. Pod wieloma względami Hawking traktował swój krąg bliskich współpracowników jak drugą rodzinę.

John Wheeler powiedział kiedyś, że istnieją trzy sposoby uprawiania wielkiej nauki: kreta, kundla i kartografa. Kret zaczyna kopać w jednym miejscu w ziemi i systematycznie prze do przodu. Kundel węszy wokół i podąża od jednej wskazówki do drugiej. Natomiast kartograf tworzy ogólny obraz, ma intuicję, jak różne rzeczy do siebie pasują, dzięki czemu znajduje drogę do nowego zrozumienia. Moim zdaniem Hawking był kartografem.

Podczas gdy Sciama niezwykle skutecznie łączył ludzi wokół kluczowych nierozwiązanych problemów fizyki teoretycznej, Stephen wywiódł ze swej mapy własny klarowny plan. Ale byliśmy mu potrzebni, by wypełnić puste miejsca na jego mapie. Od pierwszego dnia Stephen oczekiwał, że będziemy z nim pracować nad przekształceniem tego wielkiego intuicyjnego obrazu w jego umyśle w pełnoprawne projekty badawcze i je zrealizować. W związku z tym miał z nami bliższe relacje niż większość innych opiekunów naukowych.

Ponieważ komunikacja za pośrednictwem syntezy mowy była z konieczności ograniczona — nie tylko pod względem słów, lecz zwłaszcza manipulowania równaniami — Stephen nie mógł zapewnić zbyt wielu wskazówek w postaci szczegółowych obliczeń. Zamiast tego wyznaczał ogólne kierunki i dostosowywał je w miarę rozwoju sytuacji. Poruszanie się po mapie Stephena było szalenie trudne i frustrujące, ale stanowiło również stymulację, ponieważ zmuszało nas, jego studentów, do kreatywnego i samodzielnego myślenia.

A on nam ufał. Stephen promieniował niepohamowaną pewnością, że możemy rozwiązać te trudne kosmiczne zagadki. Ta sama bezwzględna determinacja, która pozwoliła mu wytrwać pomimo wyniszczającej choroby, objawiała się jako upór w jego pracy naukowej. Ilekroć byłem pogrążony

w rozpaczy, gdy ścieżka badań się załamywała, i czułem, że prawie udowodniłem, iż to, co próbujemy zrobić, jest niemożliwe, pojawiał się Stephen i rozkładał swoją mentalną mapę, aby dać nam nową perspektywę, wyciągnąć nas z otchłani zagłady na nowe, świeże tory. Taki był *modus operandi* Hawkinga — sięgać do najgłębszych problemów, atakować je z różnych stron i znajdować drogę wyjścia.

Świetnie się czuł w roli opiekuna naukowego *deus ex machina*. Ponadto jego zaufanie, bystry dowcip i ciepło, którymi emanował, zapewniały naszej grupie badawczej nie tylko nieprzerwany strumień nowych pomysłów, lecz również pewną intymność. Tak, szkoła Stephena w Cambridge dotyczyła czarnych dziur i wszechświata, ale wierzę, że dowiedzieliśmy się od niego jeszcze więcej o sprawach duchowych. Nauczył nas tyle samo o odwadze i pokorze oraz o tym, jak żyć, ile o kosmologii kwantowej.

Oczywiście podczas lat naszej współpracy Stephena otaczał coraz większy nimb sławy, który jednak zawsze pozostawał poza murami DAMTP. Czytając poranną gazetę, mogłem natknąć się na całostronicowe zdjęcie, na którym jechał przez Ramallah lub unosił się w powietrzu podczas lotu w stanie nieważkości, ale kiedy znalazł się w DAMTP, był naprawdę jednym z nas, prowadząc poszukiwania i starając się zrozumieć wszechświat oraz jego prawa na najgłębszym poziomie, i czerpiąc z tego wielką radość.

Stephen był cudem. Uosabiał niezwykłą mieszankę dążenia do zrozumienia niektórych z największych pytań w nauce z beztróską, pewną nieodpartą figlarnością, która mogła pojawić się w każdej chwili i w dowolnym miejscu. Pewnego razu lekkomyślnie wypisał się ze szpitala Papworth, żeby pójść na sztukę pantomimy. Jeśli chodzi o naukę, wykłady Stephena **m u s i a ł y** zawierać parę żartów². Zawsze. I mimo całego swojego tajemniczego, przypominającego wyrocznie sposobu komunikacji, czerpał przyjemność z pogawędek. (Nieważne, że one również trwały wieki).

Wyjątkowe połączenie mądrości i wesołości Stephena sprawiło, że

wszędzie wokół niego działa się coś magicznego. I, oczywiście, pomagało to, że nigdy nie mógł wejść do pokoju w cichy, dyskretny sposób.

Kiedy stanąłem u progu jego gabietu w czerwcu 1998 roku, program kosmologii kwantowej Stephena znajdował się w pełnym rozkwicie. Szaleństwo, które nastąpiło po opublikowaniu *Krótkiej historii czasu*, osłabło, druga rewolucja teorii strun dostarczyła fantastycznych teoretycznych wniosków, a zespół Stephena był pełen energii. Tymczasem postępy w technologii teleskopowej przekształcały kosmologię z pola pełnego spekulacji w ilościową naukę osadzoną w szczegółowych obserwacjach obejmujących miliardy lat kosmicznej ewolucji. To była złota dekada odkryć kosmologicznych, kiedy wydawało się, że księga natury leży przed nami otwarta.

Kluczową rolę w naszym odczytaniu pierwszych kilku stron kosmicznej historii odegrał satelita Cosmic Background Explorer, w skrócie COBE, wystrzelony przez NASA w 1989 roku. Pewien eksperyment na jego pokładzie określił, że pradawne kosmiczne mikrofalowe promieniowanie tła ma prawie idealne widmo termiczne o temperaturze 2,725 kelwina. Wkrótce jednak COBE przeprowadził drugie doświadczenie, wykorzystujące mikrofalowy radiometr różnicowy, zaprojektowany do rejestrowania niewielkich różnic w temperaturze promieniowania CMB w różnych częściach nieba. To był imponujący eksperyment. Kosmologowie od dawna wiedzieli, że wczesny wszechświat nie mógł być doskonale jednorodny po prostu dlatego, że późniejszy wszechświat też nie jest doskonale jednorodny. Dziś widzimy materię zgromadzoną w galaktykach i gromadach galaktyk. Gdyby wszechświat powstał jako idealnie jednorodny gaz, ta struktura galaktyk nigdy by się nie utworzyła, a ponieważ galaktyki są kosmiczną kolebką życia, nie mielibyśmy szansy zaistnieć. W przeciwieństwie do tego nawet najmniejsze zmiany gęstości w pierwotnym gazie z czasem mogły ulec zwiększeniu pod wpływem grawitacji, potencjalnie powodując skupianie się materii

w gęstszych regionach i tworzenie struktur kosmicznych. Obliczenia rywalizujących ze sobą efektów ekspansji i grawitacyjnego skupiania się pokazują, że aby galaktyki mogły się pojawić w ciągu dziesięciu miliardów lat, niemowlęcy wszechświat musiał zawierać kontrasty gęstości rzędu co najmniej jednej części na sto tysięcy. Od czasu nieoczekiwanego odkrycia CMB w połowie lat sześćdziesiątych kosmolodzy poszukiwali w nim śladów tych fluktuacji. Satelita COBE był ich ostatnią nadzieją. Zaprojektowany, aby osiągnąć ów kluczowy poziom czułości w poszukiwaniu naszych kosmicznych korzeni, COBE sięgał również do problemu podstawowej spójności teorii gorącego Wielkiego Wybuchu.

Ku wielkiej uldze kosmologów COBE znalazł dokładnie to, czego poszukiwano. Zebrane przez urządzenie dane ujawniły, że wczesny wszechświat rzeczywiście miał nieco gorętsze i chłodniejsze regiony. Podczas gdy **u ś r e d n i o n a** temperatura CMB ma wartość 2,7250 kelwina, może wynosić 2,7249 w jednym kierunku i 2,7251 w innym fragmencie nieba. „To jak oglądanie Boga” — oświadczył euforycznie główny naukowiec projektu COBE na konferencji prasowej.

Słabe fotony mikrofalowe są najstarszymi, które możemy zaobserwować³. Nie jesteśmy w stanie bezpośrednio zajrzeć do wcześniejszych epok. Musimy się jednak zastanowić, co spowodowało te drobne migotania pierwotnego żaru. Małe zmiany w promieniowaniu CMB muszą przecież być wynikiem procesów zachodzących w jeszcze wcześniejszych momentach. Niestety, COBE dawał nieco rozmazany obraz i nie był w stanie rozróżnić mikrofalowego promieniowania tła w skalach mniejszych niż około 10 stopni. To pozostawiło kosmologów w niewiedzy na temat pochodzenia obserwowanych nieco cieplejszych i zimniejszych plam. Ale badania COBE uświadomiły kosmologom, jaką skarbnicę wiedzy zawierają pozostałości pierwotnej kuli ognia, gdyby tylko można było odczytać to, co zapisane jest drobnym drukiem w kosmicznym mikrofalowym promieniowaniu tła. Od

czasu COBE słabe mikrofalowe tło stało się płótnem, na którym współczesna kosmologia zapisuje swe najgłębsze pytania.

Tak się więc złożyło, że pod koniec XX wieku przełomowe obserwacje astronomiczne zaczęły wreszcie odsłaniać narodziny wszechświata, urzeczywistniając wizję sformułowaną siedemdziesiąt lat wcześniej przez Lemaître'a⁴:

Ewolucję świata można porównać do pokazu sztucznych ogni, który właśnie się skończył;

kilka czerwonych smug, popiół i dym.

Stojąc na zimnym żużlu,

widzimy powolne gaśnięcie słońc,

i staramy się odtworzyć przeszły blask początku światów.

Zawsze mocno zaangażowany w łączenie teorii kosmologicznej z obserwacją, Stephen również miał duże nadzieje, że dzięki starannemu przesiewaniu tych popiołów kosmolodzy zdołają odtworzyć początki wszechświata.

W latach pięćdziesiątych Stephen przywiązał się dość mocno do swojej hipotezy braku brzegów. Sposób, w jaki pomysłowo omijała odwieczne paradoksy związane z początkiem wszystkiego, miał w sobie nieodparty urok. Dla Hawkinga był to również głos prawdy. Liczne dowody sugerują, że uważał to za swoje największe odkrycie⁵. Ale bez względu na to, jak elegancka lub piękna jest teoria kosmologiczna, prawdziwym testem są jej przewidywania, i Hawking zawsze to podkreślał. Załóżmy, że wszechświat naprawdę narodził się „z niczego”, ze sferycznej bryłki czystej przestrzeni. Jak dokładnie będzie wyglądać plamista mapa CMB? Intrygujące pytanie i jedno z najistotniejszych w ówczesnym programie Stephena, lecz by na nie odpowiedzieć, musimy najpierw wrócić do inflacji, koncepcji krótkiego etapu superszybkiej ekspansji na bardzo wczesnym stadium życia wszechświata.

Teoria kosmologicznej inflacji została zapoczątkowana na początku lat osiemdziesiątych przez fizyków teoretycznych, Alana Gutha, Andreia

Lindego, Paula Steinhardta i Andreeasa Albrechta, i jest uważana za najważniejsze udoskonalenie modelu gorącego Wielkiego Wybuchu od momentu jego powstania. Początkowo inflację traktowano jako krótką, przejściową fazę na bardzo wczesnym etapie historii wszechświata, kiedy grawitacja była silnie odpychająca, powodując ekstremalnie silne przyspieszenie ekspansji. Pionierzy inflacji przewidywali, że obserwowalny wszechświat mógłby urosnąć w ułamku sekundy o zdumiewający współczynnik 10^{30} . Odpowiada to mniej więcej różnicy skali między atomem a Drogą Mleczną.

Ta faza szybkiej ekspansji przemawiała do teoretyków, ponieważ mogła zgrabnie wyjaśnić zagadkę, o której wspominałem w rozdziale 3: dlaczego wszechświat jest tak gładki i jednorodny w największych skalach? Błyskawiczny etap superszybkiej ekspansji oznaczałby, że nawet najbardziej odległe regiony obserwowanego dziś wszechświata znajdowały się początkowo blisko siebie, na początku inflacji, pozostając w obrębie własnych horyzontów. Patrząc na ilustrację 19, wyglądałoby to tak, że nawet najkrótszy impuls superszybkiej ekspansji zepchnąłby osobliwość Wielkiego Wybuchu znacznie głębiej, tym samym tworząc pojedyncze, wzajemnie powiązane środowisko obejmujące nasz cały stożek świetlny przeszłości. Cały obserwowalny wszechświat miałby zatem wspólne pochodzenie przyczynowe, z którego mógł się wyłonić niemal taki sam w każdym miejscu.

Jednak już na pierwszy rzut oka oszałamiające liczby stojące za inflacją wydają się szalone. Ujmując to z innej perspektywy, ogromne rozdęcie przestrzeni podczas tego krótkiego momentu inflacji znacznie przekroczyłoby całkowity współczynnik ekspansji wszechświata w ciągu następnych 13,8 miliarda lat!

Jaki dziwny rodzaj materii mógł spowodować rozciągnięcie przestrzeni w tak spektakularny sposób? Jedną z możliwości zaproponowaną przez pionierów inflacji to pola skalarne. Takie pola są egzotyczną formą materii, która może się zachowywać jak niewidzialne, wypełniające przestrzeń

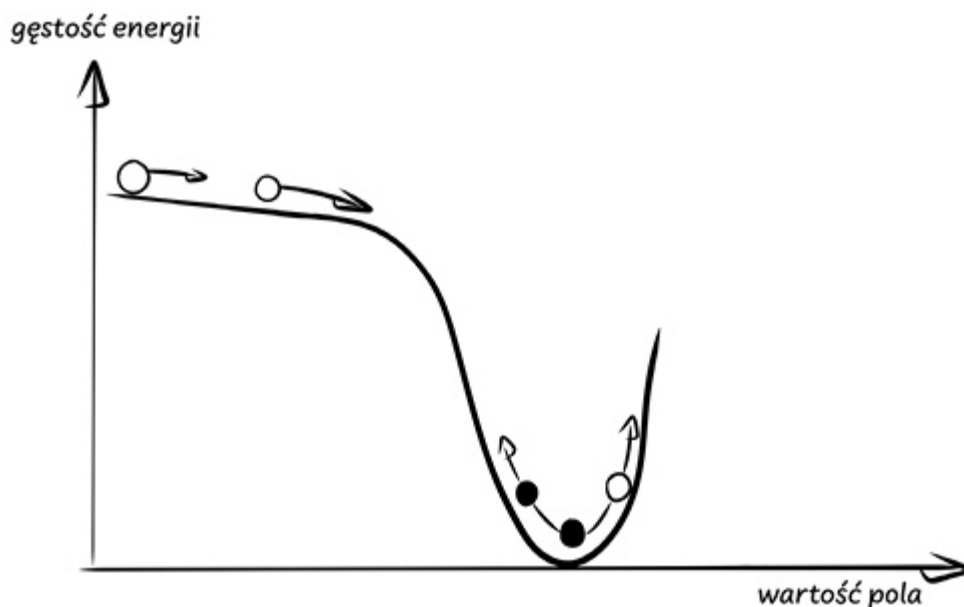
substancje podobne do pól elektrycznych i magnetycznych, lecz jeszcze prostsze, bo w każdym punkcie przestrzeni mają tylko wartość, ale są pozbawione kierunku. Jednym z dobrze znanych pól skalarnych jest pole Higgsa — ukoronowanie modelu standardowego fizyki cząstek elementarnych, odkryte w CERN⁶ w 2012 roku. Teoretyczne rozszerzenia modelu standardowego zazwyczaj zawierają dużą liczbę pól skalarnych, a niektóre z nich mogą być częścią ciemnej materii we wszechświecie. Pole odpowiedzialne za inflację jest trafnie — choć może myląco — nazywane polem inflatonowym. Jest to hipotetyczne pole, dotychczas nieodkryte w CERN ani nigdzie indziej na Ziemi, które według teorii inflacyjnych mogłoby przez krótki moment wzmocnić ekspansję wczesnego wszechświata do naprawdę oszałamiających skal.

Dlaczego pola skalarne są tak potężnymi źródłami odpychającej antygravitacji? Pola skalarne znajdują się po prawej stronie równania Einsteina (zob. strona 81) razem z innymi formami materii. Jednak w przeciwieństwie do zwykłej materii pola skalarne dzielą kilka ważnych właściwości ze stałą kosmologiczną, czyli Einsteinowskim członem λ . Podobnie jak stała kosmologiczna, jednorodnie rozłożone pola skalarne wypełniają przestrzeń nie tylko dodatnią energią powodującą przyciągającą grawitację, ale też ujemnym ciśnieniem lub napięciem, które powoduje antygravitację. Okazuje się, że antygravitacja pól skalarnych przewyższa ich grawitację, dlatego przyspieszają ekspansję, w przeciwieństwie do wszystkich innych form materii. Co więcej, inflacja czerpie siłę z rozszerzającej się przestrzeni. Podczas gdy znana materia traci energię na rzecz rozszerzającej się przestrzeni, ujemne ciśnienie, którym pole inflatonowe wypełnia wszechświat, posiada taką właściwość, że tak jak stała kosmologiczna nie rozrzedza się, ale w istocie czerpie energię z ekspansji⁷.

Kiedy w 1917 roku Einstein dodał stałą kosmologiczną do swojej teorii, precyzyjnie dobrał jej wartość λ , tak aby jej odpychanie idealnie równoważyło grawitacyjne przyciąganie materii, by wszechświat pozostał statyczny.

Sześćdziesiąt lat później pionierzy inflacji posunęli się znacznie dalej i przewidzieli, że antygravitacja pola inflatonowego w krótkim momencie wczesnego wszechświata mogła znacznie przerosnąć wszystkie źródła przyciągającej grawitacji i spowodować prawdziwą eksplozję Wielkiego Wybuchu — szybki impuls gigantycznej kosmicznej ekspansji.

Ilustracja 27 pokazuje schemat działania teorii inflacyjnej. Krzywa przedstawia gęstość energii zawartą w (hipotetycznym) polu inflatonowym dla różnych wartości pola. Wysokość tej krzywej jest miarą siły antygravitacji inflatonu. Kosmologia inflacyjna zakłada, że na najwcześniejszych etapach wszechświata istniał niewielki obszar przestrzeni, w którym pole inflatonowe w jakiś sposób znalazło się wysoko na wypłaszczeniu krzywej energii. Mogło to spowodować inflację tego skrawka przestrzeni, podczas gdy pole inflatonowe w jego wnętrzu łagodnie staczało się w kierunku doliny w swoim energetycznym krajobrazie. Gdy inflaton osiągnął swój stan minimalnej energii, inflacja uległa zatrzymaniu. Kosmiczny skok rozwojowy wyhamowuje, a wszechświat przechodzi w znacznie bardziej umiarkowane tempo rozszerzania.



II. 27. Gęstość energii zawarta w polu inflatonowym na osi pionowej dla różnych wartości pola na osi poziomej. Podczas rozszerzania się

wszechświata pole ma tendencję do staczania się w kierunku doliny w swoim krajobrazie energetycznym.

Tak więc choć oba zjawiska prowadzą do antygravitacji, jednorodne pole inflatonowe różni się od stałej kosmologicznej pod jednym ważnym względem. Stała kosmologiczna jest oczywiście stała, natomiast wartość pola inflatonowego może się zmieniać w czasie. Ta cecha inflacji umożliwia pojawianie się i zanikanie etapów gwałtownej ekspansji — kluczową właściwość wykorzystywaną przez teoretyków inflacji.

Tymczasem pod koniec impulsu inflacyjnego ogromna ilość energii zmagazynowana w polu inflatonowym musiałaby się w coś zamienić, a to coś jest ciepłem. Kiedy inflacja ustała, staczający się inflaton mógłby wypełnić wszechświat gorącym promieniowaniem. Część tej energii cieplnej zamieniłaby się później w materię, ponieważ wzór Einsteina $E = mc^2$ mówi nam, że dopóki mamy wystarczającą ilość energii (E), aby zamienić ją na masę (m) cząstki, droga do przekształcania wysokoenergetycznych kwantów promieniowania (fotony) w masywne cząstki materii pozostaje otwarta. Pod koniec etapu inflacji uwolniona ogromna energia mogła również rozgrzać wszechświat do około tysiąca bilionów bilionów stopni, co z nawiązką wystarcza do wytworzenia 10^{50} ton materii zawartej w obserwowalnym wszechświecie.

Tak więc inflacja wytwarza fantastycznie duży i jednorodny wszechświat w czasie znacznie krótszym niż mgnienie oka. Ale co z istotną niejednorodnością w CMB, którą zaobserwował COBE? Czy inflacja wytwarza wszechświat, który jest prawie, lecz nie idealnie gładki?

W rzeczywistości tak właśnie jest. Jak wszystkie pola fizyczne również inflaton jest polem kwantowym. Zasada nieoznaczoności Heisenberga mówi, że musi też podlegać nieusuwalnemu kwantowemu rozmyciu. Podobnie jak w przypadku cząstek oznacza to, że im ściślej wyznaczymy wartość pola

w określonym miejscu, tym mniej dokładnie można poznać tempo jego zmian w tym punkcie. Jeśli jednak tempo zmian pola jest nieco nieokreślone, nie możemy wiedzieć, jaka będzie jego dokładna wartość chwilę później. Pola kwantowe stanowią zatem dziwną fluktuującą mieszaną wielu różnych szybkości zmian i wartości, podobnie jak wiele ścieżek tworzy funkcję falową cząstki.

Zazwyczaj takie fluktuacje kwantowe są niezwykle małe i ograniczone do mikroskopijnych rozmiarów. Ale gwałtowne przyspieszenie kosmicznej inflacji absolutnie nie jest czymś normalnym. Ku swojemu zdumieniu teoretycy badający inflację szybko zdali sobie sprawę, że przewidywany przez nich ogromny wzrost ekspansji wzmocni mikroskopijne fluktuacje kwantowe i rozciągnie je do obserwowanych falowych makroskopowych zmian. Nawet jeśli pole inflatonowe początkowo przyjmowało absolutnie minimalny poziom oscylacji, na który pozwala zasada nieoznaczoności, wybuch ekspansji inflacyjnej przekształciłby je w makroskopowe zaburzenia, nakładając na ogólną gładkość rozszerzającego się wszechświata fałdy wzór zmian w tym polu, przypominający zmarszczki na powierzchni gładkiego jeziora.

Co najważniejsze, kiedy inflacja dobiega końca i inflaton uwalnia swoją energię w eksplozji ciepła, gorący gaz, który wypełnia nowo narodzony wszechświat, dziedziczy te zmiany. W wyniku tego wszechświat wyłaniający się z inflacji jest obdarzony małą nieregularnością temperatury promieniowania oraz gęstości materii. Pod wpływem spowalniającej ekspansji kosmologicznej coraz więcej tych pierwotnych zmarszczek przedostaje się do naszego horyzontu kosmologicznego i staje się widoczne niczym fale przyływające do brzegu. Te fluktuacje w promieniowaniu moglibyśmy obserwować. Pojawiają się jako gorące i zimne miejsca w kosmicznym promieniowaniu tła, gdy porównujemy jego temperaturę w różnych kierunkach na niebie. Te zmiany gęstości materii staną się ważne, ponieważ mogą stanowić zalążki galaktyk. Regiony o początkowo mniejszej gęstości rozszerzą się szybciej i opustoszeją. Obszary z większą ilością materii zaczną

przyciągać jeszcze więcej materii ze swojego otoczenia, coraz bardziej zwiększając kontrast gęstości i w ten sposób tworząc wielkoskalową sieć galaktyk, którą widzimy dzisiaj.

Latem 1982 roku Stephen i Gary Gibbons zaprosili do Cambridge głównych teoretyków inflacji na dobrze wspomniane przez niego po latach tak zwane **p r a w d z i w e** warsztaty. Miały tytuł *The Very Early Universe* [Bardzo wczesny wszechświat] i zostały sfinansowane przez Fundację Nuffield, organizację charytatywną założoną w latach czterdziestych przez magnata samochodowego Williama Morrisa, lorda Nuffield⁸. Przez wiele dni Stephen i jego koledzy omawiali kluczowe charakterystyczne właściwości pierwotnych odchyłeń wytwarzanych przez inflację. I oto pod koniec warsztatów zgodzili się, że impuls inflacji mógł odcisnąć trudny do zauważenia, lecz charakterystyczny, wyraźnie rozpoznawalny wzorec w niewielkich fluktuacjach CMB⁹. Oznacza to, że teoretycy podczas warsztatów Nuffield określili „niepodważalny dowód” inflacji, który powinniśmy móc odkryć, jeśli tylko dokonamy skrupulatnego przeglądu nieba na częstotliwościach mikrofalowych. Ich ustalenia stanowią jedno z najbardziej spektakularnych przewidywań kosmologii teoretycznej i być może całej nauki. Falowe pozostałości inflacji — zamrożone i zachowane w promieniowaniu CMB z oszałamiającą matematyczną precyzją — są niewątpliwie jednymi z najstarszych śladów, jakie możemy mieć nadzieję kiedykolwiek zidentyfikować.

Nie bez powodu spotkanie Nuffield przeszło do legendy. Warsztaty z 1982 roku były dla kosmologii tym samym, co Pierwszy Kongres Solvaya z 1911 roku dla fizyki atomowej. Jego wyniki przyczyniły się do osiągnięcia dojrzałości przez kosmologię bardzo wczesnego wszechświata. Przewidywania teorii inflacyjnej wyraźnie pokazywały, że mechanika kwantowa niesie dalekosiężne konsekwencje nie tylko dla świata mikroskopowego, ale także dla naszych obserwacji wszechświata w największych skalach. Podobnie jak wspomniany kongres określił moment,

w którym mechanikę kwantową potraktowano jako klucz do świata atomowego, tak warsztaty Nuffield w 1982 roku wykazały, że mechanika kwantowa jest niezbędna do zrozumienia kosmologii. Teoria inflacyjna wskazywała, że gorące i zimne miejsca powiększone w promieniowaniu CMB są pierwotną kwantową niejednorodnością rozciągniętą na całym niebie. Co więcej, przewidywano, że udoskonalona wersja COBE, zdolna do wykonania ostrych zdjęć plamek CMB, będzie w stanie to wszystko zweryfikować. Taki obraz mógł ustanowić wspaniały pomost łączący nasze dzisiejsze obserwacje kosmologiczne z mikroskopijnymi oscylacjami kwantowymi mającymi miejsce nie później niż 10^{-35} sekundy po Wielkim Wybuchu.

Stephen nie krył radości z wyników warsztatów, pisząc: „Hipoteza inflacyjna ma tę wielką zaletę, że dokonuje przewidywań dotyczących obecnej gęstości wszechświata i widma odchyień od jednorodności przestrzennej. Powinno być możliwe przetestowanie ich w dość niedalekiej przyszłości i albo obalenie tej hipotezy, albo jej potwierdzenie”¹⁰.

Kleksy i plamki w promieniowaniu CMB spowodowane przez inflację są kosmologicznym odpowiednikiem promieniowania Hawkinga z czarnych dziur. Jest to kolejny fascynujący związek między czarnymi dziurami a Wielkim Wybuchem. Wspomniałem wcześniej, że promieniowanie Hawkinga pochodzi z fluktuacji kwantowych pól materii w pobliżu czarnych dziur. Fluktuacje powodują powstawanie par cząstek, które pojawiają się, istnieją przez krótką chwilę i ponownie znikają, niczym para delfinów wyskakująca na moment nad powierzchnię oceanu, zanim ponownie zanurkują. Fizycy nazywają je **cząstkami wirtualnymi**, ponieważ w przeciwieństwie do prawdziwych cząstek nie żyją wystarczająco długo, aby mogły zostać wykryte przez detektor cząstek. Jednak w pobliżu horyzontu czarnej dziury wirtualne cząstki mogą stać się realnym bytem. Dzieje się tak, ponieważ jeden członek wirtualnej pary może wpaść do czarnej dziury, umożliwiając drugiej cząstce swobodną ucieczkę do odległego wszechświata, gdzie pojawia się jako słabe promieniowanie emitowane przez

czarną dziurę¹¹. Historia wszechświata inflacyjnego przypomina historię czarnej dziury wywróconej na lewą stronę: gwałtowna ekspansja inflacyjna wzmacnia oscylacje kwantowe związane z otaczającym nas kosmologicznym horyzontem, w wyniku czego wszechświat jest tak nieznacznie niejednorodny w zakresie częstotliwości mikrofalowych. Inflacja przewiduje, że jesteśmy zanurzeni w kosmicznej kąpieli promieniowania Hawkinga.

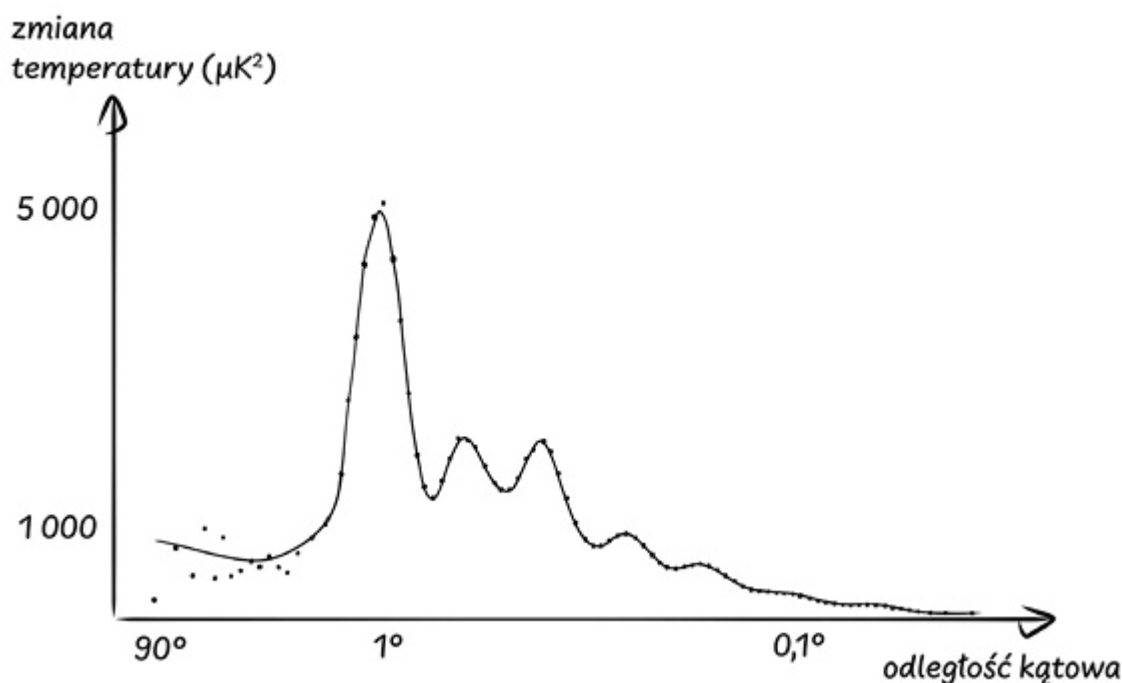
Pomimo przeciwności losu Stephen doczekał przeprowadzenia szczegółowych obserwacji kosmicznego promieniowania tła i ku swej satysfakcji przekonał się, że zarejestrowany wzorzec zmienności rzeczywiście odpowiada rytmowi inflacji.

Latem 2009 roku Europejska Agencja Kosmiczna wystrzeliła satelitę Planck, który z powodzeniem zbierał pradawne fotony mikrofalowe przez prawie piętnaście miesięcy. Satelity nadają się do tego lepiej niż teleskopy naziemne, ponieważ znajdują się poza wpływem naszej atmosfery i mogą dokonywać przeglądu całego nieba. Satelita Planck zarejestrował temperaturę i polaryzację fotonów CMB docierających do nas z milionów różnych kierunków w przestrzeni. Armia astronomów pracujących przy projekcie Planck sporządziła następnie niezwykle szczegółową mapę cieplną mikrofalowego nieba, przekształcając niewyraźny obraz COBE w niesłychanie ostre zdjęcie (zob. fot. 9 na wklejce), które skłania nas do wyobrażenia sobie mapy nieba CMB jako gigantycznej, najbardziej odległej dostępnej sfery otaczającego nas zewsząd kosmicznego horyzontu z Ziemią w środku tej kuli. Mapa CMB, którą pokazałem na ilustracji 2, jest rzutem tej sfery na płaszczyznę, tak jak się tworzy mapę świata.

Na pierwszy rzut oka punkty i plamki na sferze CMB wydają się przypadkowe, ale bliższa analiza ujawniła, że w tych kilku milionach pikseli zakodowane były od dawna poszukiwane charakterystyczne zmiany powstałe w wyniku pierwotnego wzrostu inflacji.

Ilustracja 28 przedstawia ten inflacyjny wzór fluktuacji, prezentując

oczekiwaną wartość różnic temperatury w skali kątowej na niebie, w której są mierzone. Widzimy, że poziom zmian oscyluje i zanika przy podążaniu w kierunku małych kątów, niczym dźwięk dzwonu. Zgodność danych obserwacyjnych satelity Planck — punktów — i przewidywań teoretycznych — krzywej — jest oszałamiająca. Ten falisty wzór zmian stał się jednym z najsłynniejszych obrazów współczesnej kosmologii. Powszechnie uważa się, że jest to pierwszy mocny dowód na to, że nasze najdalsze początki pochodzą z fluktuacji kwantowych wzmocnionych i rozciągniętych w krótkim impulsie pierwotnej inflacji. Planck (satelita) naprawdę zasłużył na swoją nazwę.



II. 28. Oczekiwany poziom różnicy temperatury CMB na osi pionowej został przedstawiony względem odległości kątowej między dwoma punktami na niebie pokazanej na osi poziomej. Większe kąty są po lewej, mniejsze po prawej stronie. Linia ciągła wskazuje na przewidywania teorii inflacyjnej. Kropki to punkty odpowiadające danym zebranych przez satelitę Planck. Dane niemal idealnie pasują do wzorca oscylacyjnego przewidywanego przez teorię.

Co więcej, oscylacje poziomu zmian CMB również mówią nam wiele o dzisiejszym składzie wszechświata, a nawet o jego przyszłości. Dzieje się

tak, ponieważ drobniejsze szczegóły widma fluktuacji zależą nie tylko od swojego inflacyjnego pochodzenia, ale również od geometrii wszechświata podczas jego ewolucji. Wykorzystując teorię Einsteina do powiązania geometrycznego kształtu czasoprzestrzeni z jej zawartością, precyzyjne dane z Plancka pozwoliły fizykom wiele się dowiedzieć na temat składu wszechświata.

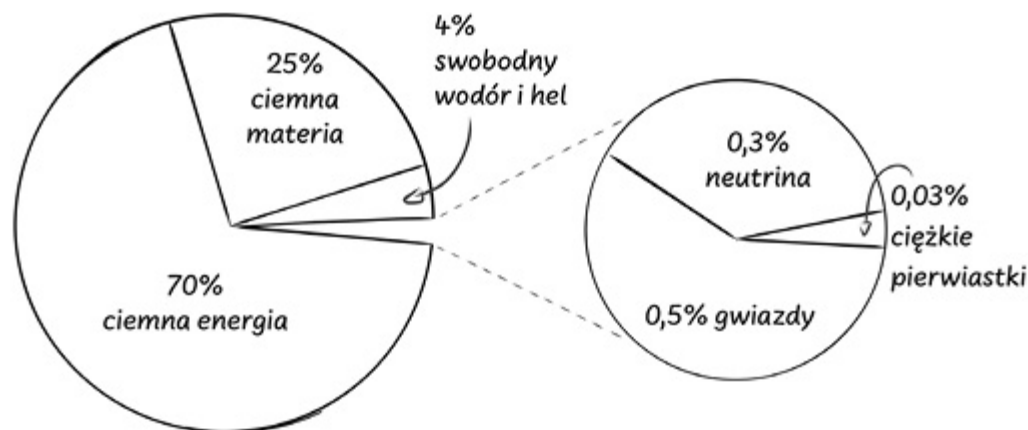
Weźmy na przykład położenie pierwszego wierzchołka na ilustracji 28, który występuje dla odległości kątowej około jednego stopnia na niebie (dla porównania średnica Księżyca w pełni to około pół stopnia). Położenie tego wierzchołka pokazuje, że kształt przestrzenny obserwowanego wszechświata ma bardzo małą krzywiznę. Tak więc jeśli trzy wymiary przestrzeni tworzą hipersferę, to musi ona być niewyobrażalnie wielka, skoro wygląda płasko nawet w skali naszego kosmologicznego horyzontu, podobnie jak Ziemia wokół nas wygląda płasko.

Wysokość drugiego wierzchołka pokazuje, że zwykła widzialna materia — taka jak protony i neutrony — stanowi obecnie tylko 5 procent całkowitej zawartości wszechświata. Trzeci wierzchołek przychodzi na ratunek i wskazuje, że wszechświat zawiera również około 25 procent ciemnej materii, tajemniczych rodzajów cząstek, które bardzo słabo — o ile w ogóle — oddziałują ze zwykłą materią lub światłem¹². Mimo to ciemna materia odegrała kluczową rolę w historii wszechświata, zapewniając dodatkowe przyciąganie grawitacyjne potrzebne do tego, by drobne zagęszczenia w pierwotnym gazie przekształciły się w sieć galaktyk. Możecie myśleć o ciemnej materii jako o kosmicznym rusztowaniu organizującym widzialną materię w wielkoskalowe struktury, dzięki którym nasz wszechświat nadaje się do zamieszkania.

Tak więc na podstawie wysokości i położenia pierwszych trzech wierzchołków na falistej krzywej pochodzącej z pomiarów satelity Planck dochodzimy do niepokojącego wniosku, że około 70 procent zawartości dzisiejszego wszechświata w ogóle nie jest materią. Okazuje się, że

największy kawałek kosmicznego tortu stanowi niewidzialna, jednorodna, antygravitacyjna ciemna energia, odpowiedzialna za gwałtowny wzrost ekspansji w niedawnej erze wszechświata (zob. il. 29). Ten odczyt promieniowania CMB potwierdza spektakularne odkrycie dokonane przez dwa zespoły astronomów, którzy w 1998 roku dzięki swoim obserwacjom światła odległych, wybuchających gwiazd odkryli, że ekspansja kosmosu przyspieszała w ciągu ostatnich kilku miliardów lat¹³.

Jeśli ciemna energia jest tak naprawdę stałą Einsteina λ , energią związaną z pustą przestrzenią, będzie to miało zasadniczy wpływ na daleką przyszłość wszechświata. Gdy stała kosmologiczna przejmie kontrolę, już z nami pozostanie, ponieważ w przeciwieństwie do pola inflatonowego stałej nie można wyłączyć. Jeśli więc istnieje prawdziwie niezmienna stała kosmologiczna, to przyspieszanie przestrzeni będzie trwało wiecznie. W tym kosmicznym scenariuszu proces powstawania nowych gwiazd i galaktyk ulegnie zatrzymaniu, istniejące galaktyki stopniowo będą znikać poza swoimi horyzontami, a nocne niebo powoli będzie się stawać coraz ciemniejsze¹⁴, pozbawiając przyszłych astronomów wielu przyjemności.



Il. 29. Wykres kołowy przedstawiający zawartość materii i energii dzisiejszego wszechświata. Składa się on w większości z ciemnej energii odpowiedzialnej za przyspieszenie ekspansji wszechświata w ciągu ostatnich miliardów lat. Pozostała część ma głównie postać nieatomowej ciemnej materii zbudowanej z nieznanych cząstek. Tylko niewielki wycinek — mniej więcej 5 procent — składa się ze zwykłej znanej materii i promieniowania.

Obecnie szeroki zakres obserwacji astronomicznych jest ze sobą zgodny. Przeprowadzono wiele weryfikacji i porównań modelu kosmologicznego przedstawionego na ilustracjach 28 i 29. Fizycy są teraz pewni, że znają z dużą precyzją skład obserwowalnego wszechświata i historię jego ekspansji. Zgodny obraz, który wyłonił się w ślad za złotą dekadą kosmologii, jest uderzająco podobny do tego, który Lemaître nakreślił prawie pięćdziesiąt lat temu: krótki wzrost inflacji, po którym następuje długotrwałe niemal zatrzymanie ekspansji i wreszcie przejście do znacznie łagodniejszej fazy przyspieszenia (zob. fot. 3 na wklejce). Według Jamesa Peeblesa, który w 2019 roku otrzymał Nagrodę Nobla z fizyki za odegranie kluczowej roli w tworzeniu spójnego modelu wyjaśniającego naszą kosmologiczną historię: „Jak dotąd na horyzoncie nie widać chmur”¹⁵.

Jedno kluczowe przewidywanie teorii inflacyjnej pozostaje jednak nieuchwytnie. Są to pierwotne fale grawitacyjne. Ponieważ inflacyjny gwałtowny wzrost ekspansji wzmacnia wszystkie fluktuacje kwantowe — łącznie z fluktuacjami samej przestrzeni — wytwarza również pewien poziom fal grawitacyjnych. Te zmarszczki przestrzeni nazywane są pierwotnymi falami grawitacyjnymi, aby odróżnić je od fal grawitacyjnych wytworzonych dużo później w zderzeniach czarnych dziur, gwiazd neutronowych lub galaktyk.

Pierwotne fale grawitacyjne pochodzące z inflacji rozszerzały się wraz z wszechświatem, począwszy od jego narodzin. Do tej pory powinny osiągnąć bardzo dużą długość, której nie można zarejestrować przez najsłynniejsze obserwatoria w kształcie litery L na powierzchni Ziemi. Jednak już samo istnienie zmarszczek grawitacyjnych pochodzących z inflacji i rozchodzących się w przestrzeni mogło wpłynąć na polaryzację fotonów mikrofalowego promieniowania tła, które podróżują przez lekko pomarszczoną geometrię przez 13,8 miliarda lat, zanim trafią w soczewki naszych teleskopów. I chociaż oczekiwany poziom pierwotnych fal grawitacyjnych jest stosunkowo niski,

teoretycy inflacji uważają, że ich polaryzujący wpływ na promieniowanie CMB powinien być wykrywalny.

Niestety, satelita Planck nie był wyposażony w wystarczająco czułe polarymetry. Późniejszy eksperyment, który miał na celu pomiar polaryzacji CMB, wykonywany na Antarktydzie w Stacji Amundsena-Scotta na biegunie południowym, odkrył tego rodzaju polaryzację pochodzącą od inflacji, ale szczegółowa analiza danych wykazała, że tę polaryzację można przypisać wpływowi pyłu galaktycznego. Jednak kosmolodzy nie poddają się. Planowane są nowe misje satelitarne mające na celu poszukiwanie śladów pierwotnych fal grawitacyjnych w kosmicznym mikrofalowym promieniowaniu tła. Nawet jeśli fale grawitacyjne pochodzące z inflacji nie będą zawierać zbyt wielu informacji, to ich pośrednia obserwacja i tak będzie odkryciem stymulującym. Nie tylko umocniłoby to teorię inflacji, ale stanowiłoby też pierwszy namacalny dowód prawdziwie kwantowego pochodzenia pola czasoprzestrzeni, podobnie jak w przypadku wszystkich znanych pól materii.

Stephen również pokładał swoje nadzieje w wykryciu fal grawitacyjnych pochodzących z inflacji. W chwili śmierci pracował nad artykułem, w którym miał nadzieję uściślić przewidywania teorii inflacyjnej dotyczące oczekiwanego poziomu pierwotnych fal grawitacyjnych. Grał tym projektem o dużą stawkę, ponieważ inflacyjne rozciąganie kwantowych fluktuacji przestrzeni do rozmiarów makroskopowych jest kosmologicznym odpowiednikiem procesu odpowiedzialnego za promieniowanie Hawkinga pochodzące z czarnych dziur. Większość fizyków zgodziłaby się z tym, że znalezienie śladu pierwotnych fal grawitacyjnych rzeczywiście mogłoby stanowić mocny — choć pośredni — dowód na istnienie promieniowania Hawkinga.

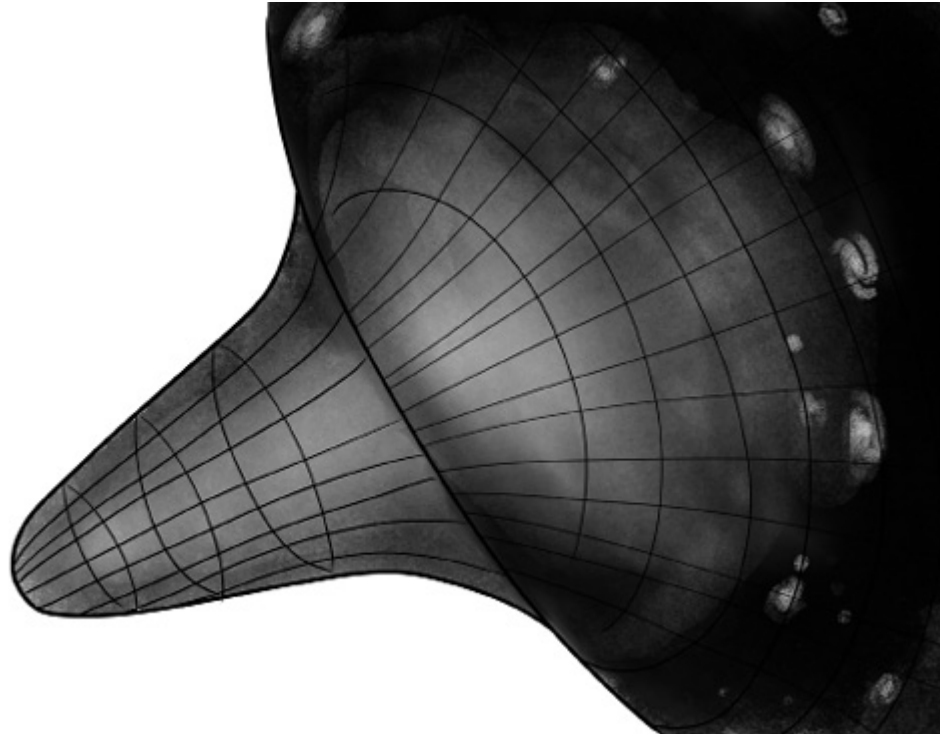
Teoria inflacji stanowi niezwykle udany opis krótkiej, ale kluczowej chwili w historii wszechświata. Mimo że dokładna natura inflatonu pozostaje

niejasna, a pierwotne fale grawitacyjne nieuchwytnie, szczegółowe obserwacje charakterystycznego wzorca oscylacji zmian temperatury prowadzą do tego, że większość kosmologów opowiada się za inflacją. Inflacja czuje się i wygląda dobrze. Ale oznacza to również, że pytanie o jej początek nabiera ogromnego znaczenia. Gdy próbujemy wyjaśnić bardzo wczesny wszechświat, musimy uważać, aby nie zamienić jednej zagadki na drugą. Bez względu na to, jak atrakcyjna z teoretycznego punktu widzenia może być inflacja, gdyby nie dało się rozpocząć znacznego wzrostu ekspansji, zostalibyśmy z pustymi rękami, a inflacja przestałaby się liczyć jako fizyczny model wczesnego wszechświata. Tak działa nauka.

Co więc jest potrzebne do rozpoczęcia inflacji? W jaki sposób pole inflatonowe może się wznieść wysoko na swój wierzchołek energetyczny? W tym miejscu pojawia się postulat braku brzegów. Co ciekawe, hipoteza braku brzegów **p r z e w i d u j e**, że wszechświat powstał w gwałtownym wzroście inflacji. Matematycznie rzecz ujmując, dzieje się tak, ponieważ zaokrąglony kształt na dnie czasoprzestrzeni w procesie tworzenia pozbawionym brzegów wymaga tego samego rodzaju egzotycznej materii skalarnej — wywierającej ujemne ciśnienie — co inflacja. W kontekście klasycznej kosmologii z czasem rzeczywistym materia z ujemnym ciśnieniem może powodować gwałtowną pędzącą ekspansję — inflację. W kosmologii kwantowej z czasem urojonym to samo ujemne ciśnienie jest potrzebne, aby umożliwić zamknięcie dna czasoprzestrzeni gładko niczym kulę. Tak więc akt stwórczy pozbawiony brzegów i ekspansja inflacyjna to bliźniacze procesy, które idą ze sobą w parze. Wzmacniają się nawzajem, przy czym pierwszy jest kwantowym dopełnieniem drugiego (zob. il. 30). Z fizycznego punktu widzenia oznacza to, że gdyby wszechświat został stworzony z niczego — zgodnie z zasadami teorii brzegów — prawdopodobieństwo, że będzie podążał za większością możliwych historii ekspansji, byłoby całkowicie pomijalne. Ale istniałaby jedna szczególna rodzina trajektorii, które są znacznie bardziej prawdopodobne niż inne. Są to modele ekspansji, w których

wszechświat powstaje w krótkim epizodzie ekspansji inflacyjnej, a następnie zwalnia.

Wspomniałem w rozdziale 1, że na każdym poziomie ewolucji determinizm kształtuje tylko najbardziej ogólne trendy strukturalne. Zazwyczaj można z wyprzedzeniem przewidzieć jedynie najbardziej zgrubne właściwości. Zgodnie z hipotezą braku brzegów taką strukturalną właściwością ewolucji kosmologicznej byłaby jakaś forma inflacji.



II. 30. Hipoteza braku brzegów Jima i Stephena opisująca powstanie wszechświata przewiduje, że wszechświat narodził się z inflacyjnego impulsu superszybkiej ekspansji.

Odkrycie tego intrygującego związku między hipotezą braku brzegów a inflacją było ekscytującym doświadczeniem dla więcej niż jednego pokolenia uczniów Hawkinga. I niesie ze sobą dalekosiężne konsekwencje. Pionierzy inflacji wyobrażali ją sobie jako pośrednią, przejściową fazę we wcześniej już istniejącym wszechświecie. Jej kwantowe uzupełnienie sugeruje jednak, że inflacja **j e s t** początkiem. W kontekście postulatu braku brzegów

inflacja staje się częścią procesu fizycznego, w ramach którego z losowego kwantowego rozmycia wyłania się klasyczna tkanka czasoprzestrzeni. Zatem postulat braku brzegów przenosi inflację na wyższy poziom, wiążąc ją z samym istnieniem czasoprzestrzeni. Źródłem inflacji nie byłby tajemniczy ślepy traf ani wynik działania „palca Bożego”, który nadał inflatonowi odpowiednio dużą wartość, lecz kosmiczna konieczność istnienia wszechświata.

Jest jednak pewien problem. Otóż postulat braku brzegów przewiduje najmniejszy możliwy wzrost inflacji. Siła pierwotnego impulsu ekspansji jest określona przez początkową wartość pola inflatonowego. Wszechświaty, w których inflaton na początku znajduje się wysoko na swym wzniesieniu energetycznym (zob. il. 27), poddane są gigantycznemu wzrostowi inflacji. Stają się większe i mają wystarczającą ilość materii, aby utworzyć miliardy galaktyk. Przypominają wszechświat, który obserwujemy. Natomiast wszechświaty, w których inflaton ma swój początek w pobliżu dolnej krawędzi swojego wypłaszczenia energetycznego, wyłaniają się zaledwie ze śladową inflacją. Takie wszechświaty stają się prawie puste, pozbawione galaktyk, a nawet mogą ponownie się zapaść w Wielkim Kolapsie. Zupełnie nie przypominają naszego wszechświata. Niestety, konsekwentne zastosowanie teorii braku brzegów powoduje wybór właśnie tych ostatnich wszechświatów. Teoria ta wydaje się mówić, że powinniśmy znaleźć się we wszechświecie, w którym nie ma dla nas miejsca. Nic więc dziwnego, że większość fizyków ma trudności z poważnym zaangażowaniem się w kreację pozbawioną brzegów. I przypomina to słonia w menażerii, odkąd Jim i Stephen przedstawili swój model kosmogenezy.

Przyjrzyjmy się bliżej temu słoniowi. Zagadka początku inflacji jest ściśle powiązana z zagadką strzałki czasu — kolejną oczywistą właściwością świata. Z codziennego doświadczenia jasno wynika, że istnieje określony kierunek, w którym wszystko się dzieje. Jajka się rozbijają, ale nie składają się

z powrotem. Ludzie się starzeją, ale nie młodnieją. Gwiazdy zapadają się w czarne dziury, ale nie wychodzą stamtąd ponownie. Przede wszystkim zaś pamiętamy przeszłość, nie przyszłość. Ta kierunkowość, owa strzałka czasu, jest jedną z najpotężniejszych i najbardziej uniwersalnych zasad organizacyjnych stojących za działaniem świata fizycznego. Po prostu nigdy nie natrafiamy na jajka zbierające się w jedną całość czy czarne dziury wyrzucające gwiazdy. Skąd zatem czas uzyskał tak wyraźny kierunek?

W starożytności ludzie mieli teleologiczny pogląd na strzałkę czasu. Oczywista kierunkowość wielu zdarzeń idealnie pasowała do idei Arystotelesa, że działaniami natury kieruje „Ostateczna Przyczyna”.

Dziś natomiast rozumiemy, że strzałka czasu faktycznie wynika z tendencji do zwiększania się nieporządku. Pomyślmy o własnym gabinecie lub sypialni, w których panuje coraz większy bałagan, jeśli nie włożymy sporego wysiłku w utrzymanie porządku. Dzieje się tak, ponieważ istnieje dużo więcej sposobów nabałaganienia w gabinecie niż jego uporządkowania. Albo weźmy pod uwagę układankę. Jeśli potrząśniemy pudełkiem, bardzo byśmy się zdziwili, gdyby po jego otwarciu wszystkie elementy były idealnie ułożone jak na obrazku z opakowania. To znów dlatego, że występuje o wiele więcej konfiguracji odpowiadających nieuporządkowanej układance niż uporządkowanej. Te przykłady ilustrują uniwersalną właściwość układów fizycznych: istnieje znacznie więcej sposobów na bałagan niż na porządek i dlatego układy fizyczne składające się z wielu elementów mają skłonność do ewoluowania w kierunku większego nieładu.

Naukowcy mierzą stopień nieporządku w układzie fizycznym za pomocą jego **e n t r o p i i**, koncepcji, która wywodzi się od dziewiętnastowiecznego austriackiego fizyka Ludwiga Boltzmann. Wysoka entropia oznacza, że układ jest w stanie wysoce nieuporządkowanym, a niska entropia określa jego duże uporządkowanie. Tendencja złożonych układów fizycznych do ewoluowania w kierunku stanów o wyższej entropii przejawia się w postaci quasi-

uniwersalnej strzałki czasu, znanej jako druga zasada termodynamiki. Ta entropiczna strzałka jest źródłem doświadczanej przez nas strzałki czasu.

Ale tu napotykaemy zagadkę. Entropia oczywiście może wzrosnąć tylko wtedy, gdy początkowo znajduje się na niskim poziomie. Dlaczego więc wczoraj entropia była niższa niż dzisiaj? Jak to się dzieje, że mamy nierozbite jajka o niskiej entropii, z których można zrobić omlet? Jajka pochodzą od kur, które są układami o niskiej entropii na fermach, będących częścią biosfery o niskiej entropii. Aby podtrzymać swoje istnienie, biosfera Ziemi korzysta z energii słonecznej o niskiej entropii. Skąd więc wzięło się Słońce o niskiej entropii? Słońce powstało z obłoku gazu o bardzo niskiej entropii, który około pięciu miliardów lat temu zapadł się i utworzył Słońce, a sam był pozostałością po poprzednich populacjach gwiazd. A co z obłokiem gazu o ekstremalnie niskiej entropii odpowiedzialnym za pierwszą populację gwiazd? Obłok ten mógł ostatecznie wyłonić się z niewielkich różnic gęstości gorącego gazu wypełniającego wczesny wszechświat, których załążki mogły się pojawić podczas inflacji. Wszechświat pod koniec inflacji musiał mieć naprawdę wyjątkowo niską entropię.

Tak więc historia o kurze i jajku mówi nam coś głębokiego. Pokazuje, że ostateczne źródło porządku, czyli powód, dla którego spotykamy dzisiaj nierozbite jajka o niskiej entropii, ma związek z naszymi początkami w Wielkim Wybuchu. Niemal czternaście miliardów lat temu wszechświat rozpoczął się w niewiarygodnie uporządkowany sposób i od tego czasu jego naturalna ewolucja prowadzi w kierunku coraz większego nieporządku. Strzałka czasu, która odróżnia przeszłość od przyszłości — będąca prawdopodobnie najbardziej podstawowym elementem naszego doświadczenia — wywodzi się z niezwykle uporządkowanego stanu pierwotnego wszechświata o niskiej entropii. Jest to być może najbardziej enigmatyczna ze wszystkich sprzyjających życiu właściwości. Jak wszechświat powstał w stanie o tak niesamowicie niskiej entropii? Czy epizod inflacji w jakiś sprytny sposób obniżył entropię bardzo wczesnego

wszechświata, naruszając drugą zasadę termodynamiki? Tak się nie stało. Entropia zwiększała się podczas inflacji (choć wolniej, niż mogła) i nadal rosła wraz z ewolucją kosmosu.

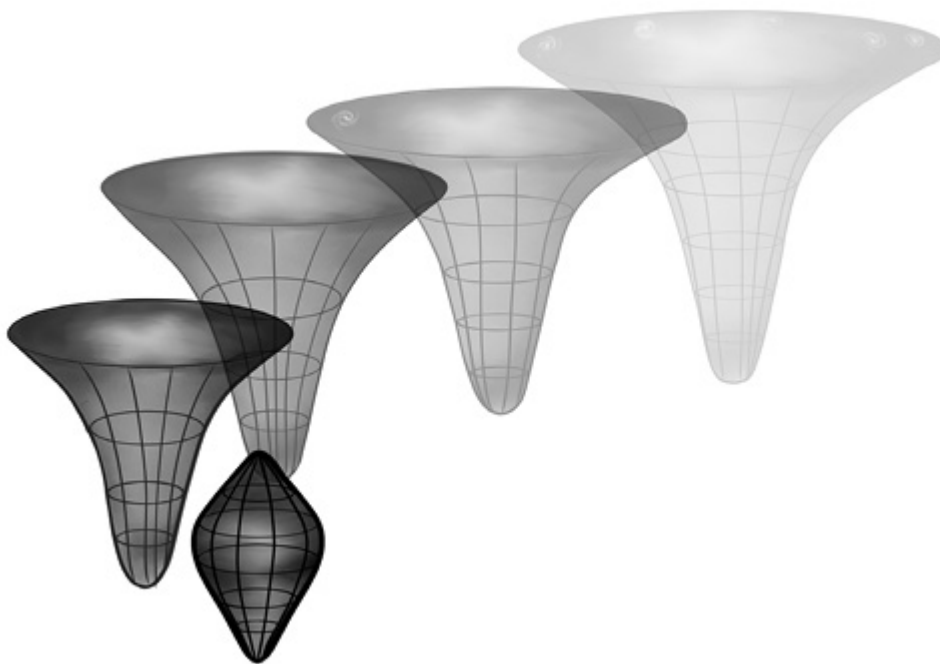
Najmocniej na ten punkt zwrócił uwagę Penrose, który z tego powodu nazywa inflację „fantazją”. Aby inflacja mogła się rozpocząć, pole inflatonowe musiało się znajdować w stanie o wyjątkowo niskiej entropii, umieszczonym wysoko na krzywej energii, który Penrose uważa za nieakceptowalnie precyzyjnie dostrojony warunek początkowy. Ale osadzenie teorii inflacyjnej w kosmologii kwantowej może potencjalnie rozwiązać obawy Penrose’a. Jako teoria łącząca dynamikę z warunkami początkowymi hipoteza braku brzegów ma wbudowaną pewną asymetrię czasową z gładkimi inflacyjnymi narodzinami na jednym końcu kosmologicznej historii i otwartym, nieuporządkowanym stanem na drugim. Strzałka czasu sugerowana przez postulat braku brzegów nie pojawia się jednak nigdzie na tyle wyraźnie, by tchnąć życie we wszechświat. Umieszczając inflaton jedynie nieco powyżej poziomu, w stanie pośredniej entropii, model Jima i Stephena wydawał się tworzyć wszechświat nie z hukiem, ale ze skomleniem. Hipoteza braku brzegów być może jest elegancka, głęboka i piękna, ale nie działa. Zwycięża druga zasada termodynamiki.

Był tylko jeden promyk nadziei. Tę nadzieję zamierzano odnaleźć w kwantowych korzeniach hipotezy braku brzegów. Jako teoria funkcji falowej wszechświata koncepcja braku brzegów nie wybiera jednoznacznie absolutnie minimalnej wartości inflacji, ale opisuje nieco rozmyte pochodzenie wszechświata. Tak jak funkcja falowa pojedynczego elektronu obejmuje splot trajektorii elektronów, gdzie każda z nich ma określoną amplitudę, tak też funkcja falowa braku brzegów rozciąga się na wiele inflacyjnych wszechświatów, z których każdy ma inną wartość początkową inflatonu. Wszechświat kwantowy to nie tylko pojedyncza rozszerzająca się przestrzeń, ale różne możliwe historie ekspansji istniejące w superpozycji

w podobny sposób, w jaki doktor Brown wyjaśnił to Marty'emu na tablicy w filmie *Powrót do przyszłości*.

Żeby się wczuć w ten abstrakcyjny kosmos kwantowy, ponownie rozważmy rozszerzający się wszechświat w kształcie okręgu. Ilustracja 30 przedstawia narodziny takiego jednowymiarowego wszechświata, który przechodzi inflację, spowalnia i ponownie przyspiesza swoje rozszerzanie. Ale to tylko jedna szczególna historia ekspansji, reprezentująca zaledwie drobny fragment funkcji falowej braku brzegów. Okrąg na ilustracji 30 podąża po jednym konkretnym grzbiecie fali w znacznie większej rzeczywistości kwantowej. Aby zobrazować funkcję falową braku brzegów w całości, należałoby wyobrazić sobie zbiór okręgów, z których każdy rozszerza się w charakterystyczny dla siebie sposób. Mój pomysł na przedstawienie tej koncepcji obrazuje ilustracja 31. Zbiór historii ekspansji w pewnym sensie współistnieje w fali braku brzegów, co jest uderzającym przejawem rozmytej natury czasoprzestrzeni we wszechświecie kwantowym.

To współistnienie wszechświatów jest zarówno intrygujące, jak i dezorientujące. W klasycznej teorii względności jedna czasoprzestrzeń nie ma nic wspólnego z inną. Na przykład każda krzywa na słynnym wykresie Lemaître'a (zob. fot. 1 na wklejce) opisuje oddzielny wszechświat, a w teorii Einsteina nie ma żadnego kryterium mogącego przypisać większe znaczenie któremukolwiek z nich. Inaczej jest w kosmologii kwantowej, gdzie funkcja falowa wszechświata operuje na ogromnym zbiorze wszystkich możliwych historii. Tak jak mechanika kwantowa elektronu splata ze sobą różne możliwe trajektorie w jednym obiekcie — funkcji falowej elektronu — tak funkcja falowa braku brzegów łączy różne możliwe historie ekspansji pod jednym szyldem. Właśnie w tym tkwi jej zdolność do uzyskania dalszych teoretycznych wniosków dotyczących pytania „Która krzywa powinna być nasza?”, tak kluczowego dla zagadki projektu.



II. 31. W mechanice kwantowej funkcja falowa cząstki obejmuje wszystkie możliwe ścieżki cząstki (zob. il. 21). Podobnie funkcja falowa wszechświata opisuje zbiór różnych możliwych historii ekspansji wszechświata. Kształt funkcji falowej braku brzegów Hawkinga — brany za dobrą monetę — jest zdominowany przez wszechświaty, które przechodzą krótką fazę inflacji i szybko ulegają kolapsowi. Teoria nie wyklucza wszechświatów z silnym impulsem inflacji, które tworzą galaktyki i nadają się do zamieszkania, ale znajdują się one daleko w ogonie funkcji falowej. W tej teorii są one ledwo widoczne.

Co ciekawe, owo połączenie oznacza również, że funkcja falowa jako całość nie zmienia się w czasie. I rzeczywiście, na ilustracji 31 nie wskazałem nadrzędnego pojęcia czasu, czyli zegara, względem którego można mówić o ewolucji całego zbioru rozszerzających się wszechświatów. Czas w kosmologii kwantowej traci znaczenie jako podstawowa zasada organizująca¹⁶. Zamiast tego odczuwalne pojęcie czasu wyłania się tylko jako wewnętrzna cecha wewnątrz każdej rozszerzającej się przestrzeni. Wynika to stąd, że miara czasu zawsze wiąże się ze zmianą jednej właściwości fizycznej względem innej. Na przykład jako zegara dla naszego własnego wszechświata

możemy użyć monotonicznego stygnięcia kosmicznego promieniowania tła wywołanego ekspansją (choć nie byłaby to zbyt praktyczna jednostka czasu do planowania spotkań). Ale ewolucja temperatury CMB w jednej czasoprzestrzeni jest oczywiście bezużyteczna jako zegar w innej czasoprzestrzeni.

Niestety jednak, naturalne rozprzestrzenianie się fali braku brzegów nie jest wystarczająco intensywne, aby spowodować w którymkolwiek z nadających się do zamieszkania wszechświatów silny impuls inflacji. Jako fala prawdopodobieństwa nadająca moc impulsu inflacyjnego funkcja falowa braku brzegów ma niezwykle ostry wierzchołek dla wszechświata o minimalnej inflacji i tylko wykładniczo malejący ogon rozciągający się w kierunku wszechświatów z bardziej znaczącym wzrostem inflacji. Tak więc, podczas gdy postulat braku brzegów głęboko współgra z inflacją, wykorzystując ten sam rodzaj ujemnego ciśnienia do stworzenia czasoprzestrzeni, oznacza to również, że najmniejszy impuls inflacji — ledwie wystarczający do zaistnienia wszechświata — jest zdecydowanie bardziej prawdopodobny niż bardziej interesujące historie ekspansji z większą inflacją.

Ten stan rzeczy jest zastanawiający. Czy powinniśmy oczekiwać, że żyjemy w najbardziej prawdopodobnym wszechświecie? Co jednak ważniejsze, czy powinniśmy porzucić teorię funkcji falowej wszechświata, ponieważ wszechświat, który obserwujemy, leży w bardzo dalekim ogonie fali prawdopodobieństwa? Pamiętajmy, że potrzeba materii w postaci atomów, aby obserwatorzy mogli się zastanawiać, w którym wszechświecie się znajdują. Jeśli najbardziej prawdopodobny wszechświat w teorii kosmologicznej jest pusty i pozbawiony życia, nie powinniśmy się dziwić, że nie jest to miejsce, w którym się znaleźliśmy. Co więcej, jeśli pewne właściwości wszechświata — takie jak galaktyki — są niezbędne do istnienia życia, nie powinniśmy lekką ręką odrzucać funkcji falowej wszechświata, która przewiduje, że najbardziej prawdopodobny wszechświat nie zawiera galaktyk. Liczy się nie to, co jest najbardziej prawdopodobne w teorii, ale to, co jest najbardziej

prawdopodobne do zaobserwowania. Kosmologicznych historii, które nie rodzą obserwatorów, nie można brać pod uwagę, gdy porównujemy nasze teorie z obserwacjami.

Rozumując w ten sposób, w 1997 roku Stephen i Neil Turok próbowali uratować teorię braku brzegów, rozszerzając ją o warunek antropiczny, mówiący o tym, że to „my” powinniśmy istnieć we wszechświecie¹⁷. Jednak odkryli, że to zastrzeżenie prawie nic nie zmienia: teoria uzupełniona zasadą antropiczną doprowadziła do przewidywania wszechświata z tylko jedną galaktyką — naszą — i niczym, co w jakikolwiek sposób mogłoby przypominać wszechświat taki jak obserwowany przez nas, w którym roi się od galaktyk. Wydaje się, że ten rozczarowujący wynik wywarł wówczas wielkie wrażenie na Turoku, który radykalnie zmienił podejście i zaczął obmyślać nowe sposoby na całkowite uniknięcie początku. Stephen pozostał jednak przy postulacie braku brzegów; patrząc z perspektywy czasu, dopiero się rozkręcał.

Tymczasem z prac Andreia Lindego i Alexandra Vilenkina — urodzonego w Związku Sowieckim amerykańskiego kosmologa i oszczędnego w słowach głębokiego myśliciela, pracującego na Uniwersytecie Tufts — wyłoniła się konkurencyjna wizja pochodzenia inflacji. Ich propozycja była tak radykalna, a jej implikacje tak oszałamiające, że od tamtej pory przykuły uwagę społeczności kosmologicznej: to multiświat.

Linde i Vilenkin wywrócili do góry nogami problem początku inflacji. Uważali, że inflacja zawsze była naturalnym stanem wszechświata i że w istocie trudno jest ją zatrzymać. Zasugerowali więc, że ekspansja inflacyjna jest z natury wieczna¹⁸. Ich rozumowanie obejmowało ten sam rodzaj kwantowych fluktuacji, które rozwijają się w zalążki galaktyk podczas inflacji, ale traktowanych teraz w znacznie większych skalach, wykraczających daleko poza nasz kosmologiczny horyzont. Jeśli inflacja wytworzyła zmarszczki o tak wyjątkowo dużych długościach fal, oznacza to,

że natężenie pola inflatonowego będzie fluktuować na tych ogromnych odległościach. W niektórych regionach fluktuacje mogą umożliwić stoczenie się inflatonu i wyhamowanie inflacji, dając początek gorącemu Wielkiemu Wybuchowi, po którym następuje powolna ekspansja. Jednak w dalekich miejscach, w których inflaton doświadczał wzmacniających fluktuacyjnych przeskoków, inflacja może faktycznie wzrosnąć.

Linde i Vilenkin twierdzili, że chociaż takie regiony mogą być rzadkie, ich wyższe tempo inflacji oznacza, że tworzą tak dużo przestrzeni, iż zawsze będą rejony, w których przeważają przeskoki wzmacniające, a inflaton nadal utrzymuje wysoką wartość na swoim wypłaszczeniu energetycznym. Z perspektywy globalnej inflacja będzie więc przypominać szalejącą pandemię, samowystarczalny proces, w którym regiony poddane inflacji tworzą kolejne regiony inflacyjne, które z kolei wytwarzają lokalne wielkie wybuchy lub jeszcze większą inflację, i tak dalej — **w n i e s k o ń c z o n o ść**.

Oczywiście hipoteza ta daje radykalnie odmienny pogląd na naszą odległą przeszłość. Początkiem inflacji byłby brak początku, a sama inflacja — wiecznym i niewyczerpanym mechanizmem wytwarzającym wszechświaty. „Wszechświat jako całość jest samoreprodukującym się układem — napisał Linde — który istnieje bez końca i prawdopodobnie bez początku”¹⁹. Cały obserwowalny wszechświat byłby tylko wszechświatem wyspowym w znacznie większej przestrzeni. Kosmos jako całość byłby skomplikowaną superstrukturą — multiświatem. W obrębie jednego obszaru wyspowego kwantowe fluktuacje rozciągnięte do skal kosmicznych mogły zapoczątkować tworzenie się galaktyk. Ale rozciągnięte na znacznie większej skali fluktuacje te generowałyby zupełnie inne światy. Gdybyśmy mogli w jakiś sposób spojrzeć na kosmos z zewnątrz, zobaczylibyśmy skomplikowaną kosmiczną tkaninę powoli rozszerzających się wysp, łąk, w których zatrzymanie inflacji spowodowało proces ewolucji, osadzonych w gigantycznej, być może nieskończonej przestrzeni inflacyjnej. Niektóre wyspy mogłyby zawierać sieć

galaktyk rozciągającą się tak daleko, jak tylko może spojrzeć teleskop Jamesa Webba. Z kolei te, gdzie inflacja nagle się skończyła, nie miałyby prawie żadnej materii pozwalającej utworzyć struktury galaktyczne. Podróżowanie z jednego wszechświata wyspowego do drugiego byłoby całkowicie niemożliwe, nawet w teorii, ponieważ gwałtowna ekspansja poddanego inflacji oceanu fizycznie uniemożliwiłaby, nawet dla światła, przekroczenie rozszerzającej się otchłani oddzielającej różne wyspy. Praktycznie rzecz biorąc, każda wyspa zachowywałaby się więc jak osobny wszechświat.

To naprawdę oszałamiający obraz fizycznej rzeczywistości. Przypomina jeden z nieskończonych wszechświatów Thomasa Wrighta. Wright, osiemnastowieczny zegarmistrz, architekt i astronom samouk z Durham na północy Anglii, wyprzedził swoją epokę, kiedy wyobraził sobie, że galaktyka Drogi Mlecznej jest jedną z nieskończonej liczby galaktyk zawierających ogromny zbiór gwiazd. Jego schematyczne rysunki pozornie nieskończonej przestrzeni wypełnionej galaktykami sferycznymi są uderzająco podobne do niektórych współczesnych wizualizacji inflacyjnego multiświata (zob. fot. 7 na wklejce). Nieskończony wszechświat Wrighta zafascynował Immanuela Kanta, który mówił o galaktykach jako o „wszechświatach wyspowych”. Spekulacje Wrighta i Kanta były ważnym krokiem ku akceptacji koncepcji większego wszechświata, ale nie zyskały uznania aż do 1925 roku, kiedy Hubble odkrył, że mgławice spiralne na niebie są tak naprawdę innymi galaktykami. Tymczasem Hubble’owski rozrost wszechświata błędnie w porównaniu z tym sugerowanym przez nieskończony multiświat wynikający z rozważań teoretyków inflacyjnych.

Skomplikowana fraktalna kosmografia multiświata jest więc też nieco przerażająca. W multiświecie z wieczną inflacją znajdziemy w końcu wszechświat wyspowy, który ma galaktykę wyglądającą jak dokładna kopia Drogi Mlecznej, z układem słonecznym podobnym do naszego i identycznym domem na identycznej ulicy, w którym wasz sobowtór czyta właśnie te słowa. Co więcej, nie byłoby tylko jednej takiej kopii, lecz nieskończenie wiele.

Pewnego dnia poddałem ten pomysł ocenie naszej najmłodszej córki Salomé. Wyraziła stanowczy sprzeciw.

Podczas wspaniałej kolacji w Cambridge z okazji sześćdziesiątych urodzin Stephena — miał prawdziwy talent do urządzania przyjęć — Andrei Linde wspominał swoje pierwsze spotkanie ze Stephenem, tak jak mógł to zrobić tylko rosyjski fizyk. Było to w Moskwie w 1981 roku, gdzie Stephen miał w Instytucie Astronomicznym Sternberga wygłosić wykład na temat inflacji dla wybitnych rosyjskich fizyków. W tamtym czasie Stephen wciąż mógł mówić, ale ponieważ trudno go było zrozumieć, często wykladał, prosząc jednego ze swoich studentów o powtarzanie jego słów. Podczas tego wykładu opracowano dwuetapowy proces, w którym młody student biegle posługujący się językiem angielskim i rosyjskim, czyli Linde, został poproszony o przetłumaczenie na rosyjski tego, co powiedział student Stephena o tym, co powiedział Stephen. Jako jeden ze współodkrywców inflacji Linde dobrze znał ten temat, a będąc Rosjaninem, nie mógł się oprzeć obszernemu rozwinięciu słów Stephena. Przez chwilę wszystko szło dobrze: Stephen coś powiedział, powtórzył to student Stephena, a Linde wyjaśniał. Po czym Stephen zaczął krytykować model inflacji Lindego. Przez pozostałą część wykładu Linde znalazł się w niekomfortowej sytuacji, kiedy musiał wyjaśniać rosyjskiej elicie fizyków, dlaczego czołowy kosmolog na świecie uważa, że jego własne podejście do teorii inflacji jest całkowicie błędne. To był początek przyjaźni na całe życie. Ale były to także narodziny **p o w a ż n e j** kontrowersji, która od tamtej pory zadomowiła się w dziedzinie kosmologii teoretycznej.

Spór Linde kontra Hawking w kwestii pochodzenia inflacji był w pewnym sensie powtórką polemiki Hoyle kontra Lemaître, tym razem w kosmologii półklasycznej stanowiącej syntezę fizyki klasycznej i kwantowej, którą stosowali zarówno Linde, jak i Hawking. W latach pięćdziesiątych Hoyle próbował utrzymać ideę wszechświata stanu stacjonarnego, postulując ciągłe

tworzenie materii, która miała wypełnić puste przestrzenie pozostawione przez oddalające się od siebie galaktyki. Natomiast Lemaître w pełni przyjął koncepcję ewoluującego wszechświata, który był radykalnie odmienny w dalekiej przeszłości. Przechodzimy od Hoyle'a do Lindego, od klasycznej do półklasycznej kosmologii, zastępując galaktyki wszechświatami. Gdyż w podobnym duchu ciągłe tworzenie wszechświatów wyspowych w multiświecie zrodzonym przez wieczną inflację prowadzi do czegoś na kształt globalnego stanu stacjonarnego na znacznie większą skalę multiświata. Zagadka ostatecznej przyczyny inflacji — a nawet tego, czy kiedykolwiek miała ona swój początek — wydaje się znikać w multiświecie z wieczną inflacją²⁰. W przeciwieństwie do tego, nie ma śladu stanu stacjonarnego w kosmologii braku brzegów Hawkinga, która wyjaśnia pochodzenie wszechświata propozycją zmiany czasu w przestrzeń. Wręcz odwrotnie, Hawking prowadzi ewolucję aż do skrajności, zaginając czas w przestrzeń na „początku” inflacji. Podczas gdy kosmologia multiświata zakłada stabilne tło przestrzeni inflacyjnej, na którym dzieje się wszystko inne, postulat braku brzegów utrzymuje, że mechanika kwantowa staje się tak fundamentalnie ważna we wczesnym wszechświecie, że usuwa nawet to tło — samą strukturę czasoprzestrzeni.

Stephen uważał, że idea multiświata z wieczną inflacją była nadmiernym rozszerzeniem fizycznej rzeczywistości, które nie było ani uzasadnione, ani istotne dla czegokolwiek, co moglibyśmy kiedykolwiek zaobserwować. Andrei sprzeciwił się hipotezie braku brzegów na podstawie tego, że w ogóle nie przewiduje ona żadnych obserwatorów. Początek pozbawiony brzegów wybrał najsłabszy możliwy impuls inflacji, dając podwaliny pustemu, martwemu kosmosowi. Wieczna inflacja Lindego oznaczała najsilniejszy wzrost inflacji, jaki można sobie wyobrazić, powołujący do życia nie jeden, ale nieskończenie wiele wszechświatów i obserwatorów. Podczas gdy postulat braku brzegów mówi, że nie powinniśmy istnieć, wieczna inflacja obarczyła nas kryzysem tożsamości. I tak się złożyło, że kosmologia wyłoniła się ze

swojej złotej dekady z poważnie zakwestionowanymi teoriami, a jej kluczowi teoretycy pozostawali w głębokiej niezgodzie.

Multiświat poruszył wyobraźnię zarówno naukowców, jak i szerszej publiczności. Ponadto stał się niezwykle wpływowy, gdy na przełomie XX i XXI wieku zainteresowali się tą ideą teoretycy strun. Matematyczna wirtuozeria teoretyków strun obdarzyła bąbelkowy multiświat Lindego jeszcze jedną warstwą zmienności, wypełniając go nie tylko pustymi wszechświatami wyspowymi i wyspami pełnymi galaktyk, ale także wyspami różniącymi się pod każdym innym możliwym względem. To prowadzi nas do kolejnego etapu naszej podróży, który brzmi: Czy multiświat naprawdę oferuje alternatywną perspektywę dla kosmicznego precyzyjnego dostrojenia? Czy może rozwiązać zagadkę projektu?



II. 32. Stephen Hawking i Andrei Linde (stoi obok Hawkinga) w Moskwie

w 1987 roku, z Andriejem Sacharowem (siedzi) i Vahe Gurzadyanem.

- ¹ Tradycja Cambridge głosi, że Watson i Crick tak naprawdę ustalili kształt DNA w pubie The Eagle po drugiej stronie ulicy.
- ² Aby opowiedzieć dowcip w mniejszym gronie, przy ludziach zaglądających mu przez ramię i śledzących każde słowo na ekranie, Stephen opracował naprawdę pomysłowy sposób formułowania słów w taki sposób, aby do końca nie było jasne, czy przekazuje głęboką myśl, czy zwykły żart.
- ³ Teoria gorącego Wielkiego Wybuchu przewiduje również kosmiczne tło neutrin (CNB), a nawet kosmiczne tło grawitonowe. CNB, gdyby zostało zaobserwowane, pozwoliłoby zobaczyć obraz wszechświata, gdy miał zaledwie kilka sekund.
- ⁴ Georges Lemaître, *L'Hypothèse de l'atome primitif, essai de cosmogonie* (Neuchâtel: Editions du Griffon, 1946).
- ⁵ Bernard J. Carr i in., *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society: Stephen William Hawking CH CBE, 8 January 1942–14 March 2018* (London: Royal Society, 2019).
- ⁶ Europejska Organizacja Badań Jądrowych.
- ⁷ W teorii Newtona grawitacja jest wywołana wyłącznie masą i energią obiektu, ale w ogólnej teorii względności również ciśnienie wnosi wkład do grawitacji obiektu, do sposobu, w jaki zakrzywia on czasoprzestrzeń. Co więcej, w przeciwieństwie do masy, która zawsze jest dodatnia, ciśnienie może być też ujemne. Przykładem ujemnego ciśnienia jest ciągnięcie do środka, które odczuwamy, gdy rozciągamy gumkę. W teorii Einsteina dodatnie ciśnienie, podobnie jak dodatnia masa, zwiększa grawitację, natomiast ujemne ciśnienie prowadzi do odpychania lub inaczej antygravitacji.
- ⁸ W istocie było to drugie spotkanie Nuffield, które Stephen zorganizował w Cambridge. Pierwsze, dotyczące supergravitacji, „uważane za pouczający sposób spędzenia czterech tygodni”, jak żartobliwie podsumował je Stephen, równie mocno zapadło w pamięć, a tablica, która twórczo ilustrowała spotkania, dekorowała gabinet Stephena do końca jego życia (zob. fot. 10 na wklejce).
- ⁹ Głównymi autorami tych przewidywań teoretycznych byli Giennadij Chibisow, Wiaczesław Muchanow i Aleksiej Starobinski, pracujący niezależnie w Rosji, oraz James Bardeen, Alan Guth, Stephen Hawking, So-Young Pi, Paul Steinhardt i Michael Turner.
- ¹⁰ Gary W. Gibbons, Stephen W. Hawking, Stephen T.C. Siklos, red., *The Very Early Universe: Proceedings of the Nuffield Workshop, Cambridge, 21 June to 9 July, 1982* (Cambridge; New York: Cambridge University Press, 1983).
- ¹¹ Jedna cząstka w parze wirtualnych cząstek ma energię dodatnią, a druga ujemną. Cząstka o ujemnej energii nie może istnieć w normalnej czasoprzestrzeni, ale musi odnaleźć swojego partnera o dodatniej energii i anihilować razem z nim. Jednak czarna dziura zawiera stany o ujemnej energii, więc jeśli jedna cząstka z wirtualnej pary o ujemnej energii wpadnie do

czarnej dziury, może nadal istnieć bez konieczności anihilacji ze swym partnerem, który w ten sposób może swobodnie uciec. Ujemna energia wpadającej cząstki nieznacznie zmniejsza masę czarnej dziury, co wyjaśnia, dlaczego promieniowanie Hawkinga powoduje, że czarne dziury kurczą się i ostatecznie znikają.

¹² Pierwsze oznaki, że wszechświat zawiera więcej materii, niż nam się wydaje, pochodzą z lat trzydziestych XX wieku, kiedy to szwajcarski astronom Fritz Zwicky obserwował gromady galaktyk. Zwicky zauważył, że niektóre galaktyki krążą wokół innych galaktyk z zaskakująco dużymi prędkościami. Oznaczało to, że aby utrzymać takie gromady w całości, potrzeba znacznie więcej materii niż ta, która wchodzi w skład widocznych gwiazd. W latach siedemdziesiątych amerykańska astronom Vera Rubin zaobserwowała podobny efekt na obrzeżach poszczególnych galaktyk. Jej obserwacje wskazywały, że również ramiona galaktyk spiralnych muszą być zanurzone w znacznie większym obłoku ciemnej materii, utrzymującym cały ten układ razem.

¹³ Dwa zespoły astronomów, High-Z Supernova Search Team kierowany przez Adama Riessa i Briana Schmidta oraz Supernova Cosmology Project prowadzony przez Saula Perlmuttera, zmierzyły jasność i przesunięcie ku czerwieni światła pochodzącego od wybuchających gwiazd zwanych supernowymi, które są tak jasne, że widać je nawet w odległych galaktykach. Ponieważ znana jest jasność absolutna tych obiektów, naukowcy byli w stanie wykorzystać te supernowe jako wskaźniki odległości w głąb wszechświata. W połączeniu z obserwacjami przesunięcia ku czerwieni umożliwiło to obu zespołom wyznaczenie prawa Hubble'a-Lemaître'a wiążącego ze sobą odległości i prędkości ucieczki na dystansie miliardów lat świetlnych, rekonstruując w ten sposób przebieg ekspansji miliardy lat wstecz. Ku ich zaskoczeniu wykonane przez nich pomiary wykazały, że rozszerzanie się wszechświata zaczęło przyspieszać około czterech miliardów lat temu. Za to odkrycie Perlmutter, Riess i Schmidt otrzymali wspólnie Nagrodę Nobla w 2011 roku.

¹⁴ Pozostają wątpliwości, czy obecne przyspieszenie ekspansji jest napędzane przez zwykłą stałą kosmologiczną, czy też w grę wchodzi bardzo powoli zmieniające się pole skalarne. W pierwszym przypadku stosunek ciśnienia do gęstości energii byłby dokładnie równy -1 , podczas gdy w drugim byłby większy niż -1 . Ta różnica może nie wydawać się szalenie istotna, ale modyfikuje tempo przyspieszania w (bardzo) długim okresie i dlatego może wpływać na ostateczny los wszechświata. Podejmowane są starania, aby jak najdokładniej określić wartość tego stosunku.

¹⁵ Od tego czasu pojawił się mały obłok. Względnie lokalne obserwacje astronomiczne, na przykład dotyczące widm supernowych wskazują na tempo ekspansji 73 km/s na każdy megaparsek odległości. Dla porównania, tempo ekspansji otrzymane z obserwacji mikrofalowego promieniowania tła na podstawie ogólnej teorii względności wynosi około 67 km/s na każdy megaparsek. Ta rozbieżność jest znana jako „napięcie Hubble'a”, choć tak naprawdę powinno się ją nazywać „napięciem Hubble'a-Lemaître'a”. Kosmologowie gorączkowo poszukują wyjaśnienia. Czy możliwe, że jest to odpowiednik precesji

peryhelium Merkurego w ogólnej teorii względności oznaczający, że ta teoria wymaga poprawek? Bądźcie czujni!

¹⁶ Funkcje falowe w zwykłej mechanice kwantowej pozbawionej grawitacji podlegają równaniu Schrödingera, które opisuje sposób ich ewolucji w czasie. Czas jest jedyną wielkością w zwykłej mechanice kwantowej, która nie miesza się z żadną inną. Fizycy bez problemu obliczają prawdopodobieństwo w mechanice kwantowej dla obserwacji „w ściśle określonym czasie”. Jednak wszystko to jest możliwe tylko dlatego, że zwykła mechanika kwantowa zakłada, iż istnieje stałe i określone tło przestrzeni i czasu, na którym ewoluują funkcje falowe cząstek. Natomiast w kosmologii kwantowej sama czasoprzestrzeń jest obiektem kwantowomechanicznym i podlega fluktuacjom. Nie dysponujemy już więc niczym, co mogłoby pełnić funkcję uniwersalnego zegara. Dlatego czas nie pojawia się w kwantowym opisie wszechświata jako całości. To prawda, że funkcja falowa wszechświata jest zgodna z abstrakcyjną wersją równania Schrödingera, po raz pierwszy zapisaną przez Johna Wheelera i Bryce’a DeWitta, ale nie jest to prawo dynamiczne. Bardziej przypomina ponadczasowe ograniczenie nałożone na funkcję falową jako całość.

¹⁷ Stephen W. Hawking, Neil Turok, *Open inflation without false vacua*, „Physics Letters” B 425 (1998), s. 25–32.

¹⁸ O ile mi wiadomo, koncepcja wiecznej inflacji została po raz pierwszy wspomniana przez Lindego w jego artykule *The New Inflationary Universe Scenario*, w: *The Very Early Universe: Proceedings of the Nuffield Workshop, Cambridge, 21 June to 9 July, 1982*, red. G.W. Gibbons, S.W. Hawking, S.T.C. Siklos (Cambridge; New York: Cambridge University Press, 1983), s. 205–249.

¹⁹ Linde, *Universe, Life, Consciousness*, op. cit.

²⁰ Możecie się jednak zastanawiać, jak wieczna inflacja i multiświat obchodzą twierdzenie Hawkinga mówiące o tym, że w przeszłości musiała istnieć osobliwość. Nie do końca tak jest, jak pokazali Guth, Vilenkin i Arvind Borde. Teoria wiecznej inflacji po prostu przesuwą osobliwość znacznie dalej w przeszłość, ale pozostają wątpliwości, czy może być naprawdę wieczna

ROZDZIAŁ 5

Zagubieni w multiświecie

Er hat den archimedischen Punkt gefunden, hat ihn aber gegen sich ausgenutzt, offenbar hat er ihn nur unter dieser Bedingung finden dürfen.

[Człowiek] znalazł archimedesowy punkt oparcia, lecz użył go przeciwko sobie; wydaje się, że tylko pod tym warunkiem wolno mu było go znaleźć.

FRANZ KAFKA, *PARALIPOMENA*

Mam nadzieję, że stworzysz czarne dziury — powiedział Stephen, szeroko się uśmiechając. Wysiedliśmy z windy towarowej, która zabrała nas pod ziemię, do pięciopiętrowej groty mieszczącej eksperyment ATLAS¹ w laboratorium CERN, legendarnym Europejskim Centrum Badań Jądrowych pod Genewą. Dyrektor generalny CERN Rolf Heuer niespokojnie przebierał nogami. Był to 2009 rok i ktoś złożył pozew do sądu w Stanach Zjednoczonych, obawiając się, że nowo zbudowany w CERN Wielki Zderzacz Hadronów, czyli LHC, wytworzy czarne dziury lub inną formę materii egzotycznej mogącej zniszczyć Ziemię.

LHC to akcelerator cząstek w kształcie pierścienia zbudowany głównie w celu wytworzenia w zderzeniach bozonów Higgsa, w owym czasie brakującego ogniwa modelu standardowego cząstek. Zbudowany w tunelu pod granicą szwajcarsko-francuską jego całkowity obwód wynosi 27 kilometrów i przyspiesza protony² poruszające się w przeciwbieżnych wiązках po okręgu w rurach próżniowych do 99,9999991 procent prędkości światła. W trzech miejscach na pierścieniu wiązki przyspieszonych cząstek można doprowadzić do wysokoenergetycznych zderzeń, odtwarzając warunki

porównywalne z tymi, które panowały we wszechświecie w ułamku sekundy po gorącym Wielkim Wybuchu, kiedy temperatura wynosiła ponad milion miliardów stopni. Ślady rozprysku cząstek wytworzonych w tych gwałtownych zderzeniach czołowych są wychwytywane przez miliony czujników ułożonych niczym klocki Lego, tworzących gigantyczne detektory, w tym ATLAS i Compact Muon Solenoid (CMS).

Pozew został wkrótce oddalony na tej podstawie, że „hipotetyczna obawa przed przyszłą szkodą nie stanowi krzywdy wystarczającej do przychylenia się do tego wniosku”. W listopadzie tego roku LHC został pomyślnie uruchomiony — po problemach wywołanych wyciekiem helu przy wcześniejszej próbie — a detektory ATLAS i CMS wkrótce znalazły ślady bozonów Higgsa w pozostałościach po zderzeniach cząstek. Lecz jak dotąd LHC nie stworzył czarnych dziur.

Dlaczego Stephen — a myślę, że także Heuer — mimo wszystko nie odrzucali całkowicie możliwości wytworzenia czarnych dziur w LHC? Zwykle myślimy o czarnych dziurach jako pozostałościach masywnych gwiazd, które zapadły się pod własnym ciężarem. Jest to jednak zbyt wąski pogląd, ponieważ wszystko może się stać czarną dziurą, jeśli zostanie ściśnięte do odpowiednio małej objętości. Nawet pojedyncza para proton–antyproton przyspieszona niemal do prędkości światła i zderzająca się w potężnym akceleratorze cząstek mogłaby utworzyć czarną dziurę, gdyby zderzenie skupiło odpowiednią ilość energii w wystarczająco małej objętości. Z pewnością byłaby to maleńka czarna dziura istniejąca tylko przez moment, która natychmiast by wyparowała w wyniku emisji promieniowania Hawkinga.

Jednocześnie, gdyby spełniła się nadzieja Stephena i Heuera na wytworzenie czarnych dziur, oznaczałoby to kres trwających od dziesięcioleci dążeń fizyków cząstek elementarnych do badania natury przy coraz mniejszych odległościach poprzez zderzenia cząstek o coraz większych energiach. Zderzacze cząstek działają jak mikroskopy, ale grawitacja wydaje

się wyznaczać fundamentalną granicę ich rozdzielczości, ponieważ powoduje powstawanie czarnej dziury, gdy dostarczymy zbyt wiele energii, starając się zajrzeć do coraz mniejszej objętości. W tym momencie dodanie jeszcze większej ilości energii wytworzyłoby większą czarną dziurę zamiast dalszego zwiększania zdolności rozdzielczej zderzacza. Tak więc, o dziwo, grawitacja i czarne dziury całkowicie odwracają zwykły sposób myślenia w fizyce, że wyższe energie pozwalają badać mniejsze odległości. Ostatecznym celem tworzenia coraz większych akceleratorów nie wydaje się najmniejsza elementarna cegiełka — ostateczne marzenie każdego redukcjonisty — ale wyłaniająca się makroskopowa zakrzywiona czasoprzestrzeń. Wiążąc małe odległości na powrót z dużymi dystansami, grawitacja podważa głęboko zakorzenioną ideę, że architektura fizycznej rzeczywistości jest uporządkowanym układem nałożonych na siebie warstw, które możemy po kolei odsłaniać, aby dotrzeć do podstawowego najmniejszego składnika. Grawitacja — a zatem sama czasoprzestrzeń — wydaje się mieć antyredukcjonistyczny element, trudną do uchwycenia, ale ważną ideę, do której powrócę w rozdziale 7.

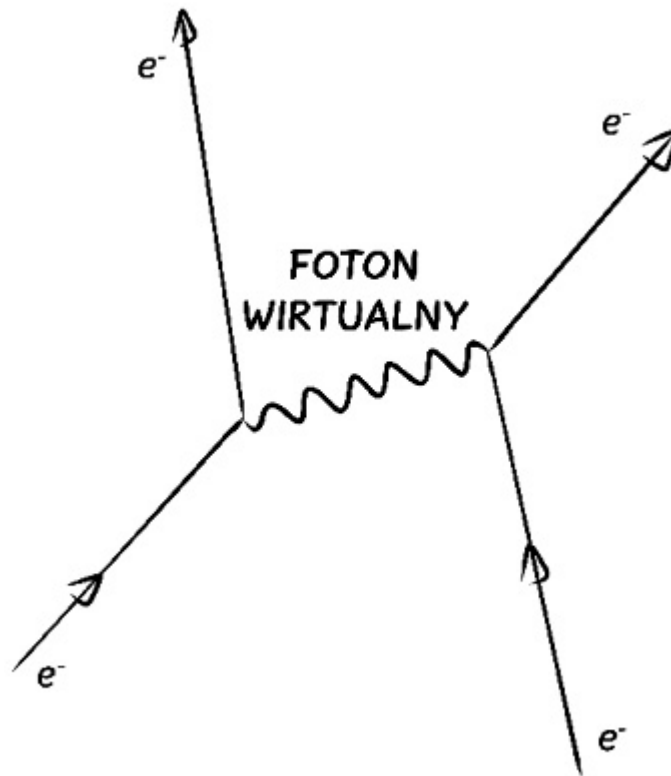
W jakiej więc skali mikroskopowej fizyka cząstek bez grawitacji przekształca się w fizykę cząstek z grawitacją? (Lub, stawiając sprawy inaczej, jak wiele kosztowałoby spełnienie marzenia Stephena o wytworzeniu czarnych dziur?) To pytanie dotyczy unifikacji wszystkich sił, tematu stanowiącego treść tego rozdziału. Poszukiwanie ujednoczonych ram obejmujących wszystkie podstawowe prawa natury było już marzeniem Einsteina. Zależy ono bezpośrednio od tego, czy multiświat naprawdę jest w stanie zaoferować nam odmienny punkt widzenia na przyjazny życiu projekt naszego wszechświata. Tylko zrozumienie, w jaki sposób wszystkie cząstki i siły harmonijnie łączą się ze sobą, może dostarczyć nowych wniosków na temat wyjątkowości podstawowych praw fizycznych — lub jej braku — a więc dotyczących spodziewanego poziomu ich zmian w całym multiświecie.

Większość widzialnej materii jest zbudowana z atomów składających się z elektronów i maleńkiego jądra będącego zlepkiem protonów i neutronów. Jądra atomowe są utrzymywane razem przez silne oddziaływania jądrowe działające na kwarki, czyli elementy składowe protonów i neutronów. Oddziaływanie silne jest silne, ale ma bardzo krótki zasięg, zmierzając ostro do zera poza odległościami rzędu dziesięciobilionowej części centymetra. Drugie oddziaływanie jądrowe — oddziaływanie słabe — działa zarówno na kwarki, jak i na cząstki materii drugiej grupy, czyli elektrony i neutrino, znane pod wspólną nazwą leptonów. Oddziaływanie słabe jest odpowiedzialne za przekształcanie niektórych cząstek jądrowych w inne. Na przykład pojedynczy neutron jest niestabilny i rozpadnie się po kilku minutach na proton i dwa leptony w procesie, w którym pośredniczą słabe oddziaływania jądrowe. Trzecie i ostatnie oddziaływanie między cząstkami, siła elektromagnetyczna, jest najbardziej znana. W przeciwieństwie do silnych i słabych oddziaływań jądrowych elektromagnetyzm, podobnie jak grawitacja, ma bardzo duży zasięg. Działa nie tylko w skali atomowej i molekularnej, wiążąc elektrony z jądrami atomowymi i atomy w cząsteczkach, ale również na odległościach makroskopowych. Nic więc dziwnego, że wraz z grawitacją elektromagnetyzm odpowiada za większość codziennych zjawisk i zastosowań, od urządzeń komunikacyjnych i skanerów MRI po tęczę i zorzę polarną.

Cała widzialna materia i trzy rodzaje oddziaływań cząstek rządzące jej zachowaniem są połączone razem w ścisłe ramy teoretyczne: model standardowy fizyki cząstek. Opracowany w latach sześćdziesiątych i na początku siedemdziesiątych model standardowy jest teorią kwantową opisującą cząstki materii i siły w kategoriach pól, falujących substancji rozchodzących się w przestrzeni, które spotkaliśmy wcześniej. Według modelu standardowego cząstki materii są niczym innym jak lokalnymi wzbudzeniami tych pól. Stany wzbudzone pól sił działające między cząstkami materii są znane jako cząstki pośredniczące lub bozony. Na przykład fotony —

cząstki pośredniczące w oddziaływaniu elektromagnetycznym — są pojedynczymi kwantami pól elektromagnetycznych.

Teoretyczne podstawy modelu standardowego w zakresie pól kwantowych głęboko kształtują sposób, w jaki opisuje on mikroskopowe funkcjonowanie świata cząstek. Weźmy pod uwagę oddziaływanie między dwoma elektronami. Gdy dwa elektrony zbliżają się do siebie, odchylają się i rozpraszają, ponieważ te same ładunki elektryczne odpychają się. Model standardowy opisuje ten proces w konkretny sposób w kategoriach wymiany fotonu między dwoma elektronami. Mówi on, że kiedy dwa elektrony wchodzą w swoją strefę wpływów, jeden elektron emituje foton, a drugi go pochłania. W wyniku tej wymiany oba elektrony ulegają niewielkiemu odrzutowi, co powoduje odchylenie ich ścieżek ruchu (zob. il. 33). Ale to nie wszystko. Sformułowanie mechaniki kwantowej przez Feynmana wykorzystujące sumy po historiach przewiduje, że należy zsumować wszystkie możliwe sposoby wymiany jednego lub większej liczby fotonów między dwoma elektronami, aby obliczyć ich wypadkowy kąt rozpraszania. Z kolei ta mnogość oznacza, że nie można dokładnie określić, gdzie i kiedy doszło do wymiany, co stanowi przejaw zasady nieoznaczoności Heisenberga.



II. 33. Tak zwany diagram Feynmana opisujący kwantowe rozpraszanie dwóch elektronów poprzez wymianę fotonu. Sformułowanie mechaniki kwantowej przez Feynmana oparte na sumach po historiach przewiduje, że aby obliczyć wypadkowy wynik procesu rozpraszania elektronów, należy wziąć pod uwagę wszystkie możliwe wymiany, w tym obejmujące więcej niż jeden foton.

Tymczasem, podczas gdy fotony są bezmasowe, podobnie jak grawitony pośredniczące w oddziaływaniu grawitacyjnym, bozony odpowiedzialne za słabe i silne siły jądrowe są bardzo ciężkie. Dlatego oddziaływania jądrowe są siłami bliskiego zasięgu, ograniczonymi do mikroskopijnej skali jąder atomowych. Ogólnie rzecz biorąc, im większa masa cząstki pośredniczącej, tym krótszy zakres przenoszonej przez nią siły. To właśnie bezmasowość mikroskopijnych kwantów oddziaływań elektromagnetycznych i grawitacyjnych sprawia, że sięgają do najdalszych krańców wszechświata.

Czy więc jest to całość modelu standardowego? Niezupełnie. Jest jeszcze jedna cząstka, wiecznie nieuchwytny bozon Higgosa — nazwany tak na cześć

brytyjskiego fizyka teoretycznego Petera Higgsa, który zapostulował jego istnienie w 1964 roku. Bozon Higgsa jest cząstką będącą kwantem pola Higgsa — niewidzialnego pola skalarnego, które, podobnie jak pole inflatonowe we wczesnym wszechświecie, jednorodnie przenika całą przestrzeń, trochę jak współczesna odmiana eteru. Pole Higgsa jest kluczowym elementem modelu standardowego nadającym masy wszystkim innym cząstkom elementarnym. Elektrony i kwarki, a nawet cząstki pośredniczące, w teorii modelu standardowego nie mają masy własnej, uzyskując ją dzięki oporowi, jakiego doświadczają w trakcie poruszania się we wszechprzenikającym polu Higgsa. To tak, jakby cząstki nieustannie brodziły w błocie w trakcie swego ruchu, a wynikający stąd opór nazywamy masą. Ilość masy uzyskiwanej przez cząstki zależy od tego, jak silnie wpływa na nie pole Higgsa. Kwarki oddziałują bardzo silnie z polem Higgsa i są ciężkie, lżejsze elektrony znacznie słabiej, podczas gdy fotony, które w ogóle z nim nie oddziałują, pozostają bezmasowe.

Pomysł pola skalarnego nadającego masę innym cząstkom został po raz pierwszy zaproponowany przez nieśmiałego Higgsa i niezależnie przez bardziej ekstrawagancki duet: Amerykanina Roberta Brouta i Belga François Englerta. Cząstka będąca wzbudzeniem tego pola stała się znana w Belgii jako bozon Brouta-Englerta-Higgsa, a wszędzie indziej jako bozon Higgsa. Stanowi zwieńczenie modelu standardowego i została ostatecznie odkryta w LHC prawie pięćdziesiąt lat później, w 2012 roku, w doświadczeniu, które stanowi prawdziwy triumf długotrwałej i głębokiej symbiozy wiedzonej ciekawością nauki, zaawansowanej inżynierii i współpracy międzynarodowej. Podobnie jak odkrycie ciemnej energii w kosmologii, eksperymentalne odkrycie bozonu Brouta-Englerta-Higgsa pokazuje po raz kolejny, że pusta przestrzeń nie jest pusta, lecz wypełniona niewidzialnymi polami, a jedno z nich odpowiada za masę materii, z której składa się prawie wszystko, z czym stykamy się w życiu codziennym. Pokazuje również, że natura naprawdę wykorzystuje pola skalarnie jako jeden z kluczowych elementów

kształtujących świat fizyczny. Odkrycie tego bozonu uwiarygodnia też istnienie podobnego pola mogącego napędzać inflację w bardzo wczesnym wszechświecie.

Do wytworzenia bozonów Higgsa potrzeba czegoś takiego jak LHC, ponieważ pole Higgsa silnie oddziałuje nie tylko z innymi cząstkami, ale również z samym sobą, nadając swym korpuskularnym kwantom dużą masę m . Einsteińskie $E = mc^2$ oznacza, że potrzeba dużo energii E , aby wzbudzić pole Higgsa na tyle, że może ono wyrzucić z siebie na bardzo krótką chwilę pojedynczy, wibrujący kwant. Tak naprawdę w LHC udaje się wytworzyć bozon Higgsa tylko w około jednym zderzeniu cząstek na dziesięć miliardów. A te bozony Higgsa istnieją tylko przez moment, rozpadając się niemal natychmiast na strumień lżejszych cząstek. Niemniej dzięki starannej analizie produktów rozpadu fizycy byli w stanie wydedukować niektóre właściwości bozonu Higgsa, w tym fakt, że waży on mniej więcej tyle co sto trzydzieści protonów. Może się to wydawać dużą masą, ale większość specjalistów uważa tę cząstkę za niezwykle lekką. Masa bozonu Higgsa jest tak naprawdę co najmniej sto milionów miliardów razy mniejsza od tego, co wielu fizyków uważa za jej naturalną wartość³. Niewielka masa bozonu Higgsa stała się jeszcze bardziej zagadkowa w 2016 roku, kiedy pomimo istotnej modernizacji LHC nie wytworzył żadnej z nowych cząstek elementarnych, których istnienie teoretycy zakładali, by niewielka masa bozonu Higgsa była łatwiejsza do zaakceptowania. Dobrze jednak, że bozon Higgsa jest lekki, ponieważ gdyby był dużo cięższy, protony i neutrony powinny też być cięższe, o wiele za ciężkie, aby tworzyć atomy. Ta nieuzasadniona lekkość bozonu Higgsa to kolejna właściwość, która sprawia, że nasz wszechświat jest odpowiednio przystosowany do pojawienia się życia.

Tymczasem model standardowy nie przewiduje wartości mas poszczególnych rodzajów cząstek, w tym bozonu Higgsa. Dzieje się tak, ponieważ sama teoria nie określa siły, z jaką każdy rodzaj cząstki oddziałuje z polem Higgsa. W sumie model ten zawiera około dwudziestu parametrów,

kluczowych liczb, takich jak masy cząstek i siły oddziaływań, których często zaskakujące wartości nie są z góry określone przez teorię, ale muszą być zmierzone eksperymentalnie i wprowadzone do wzorów ręcznie. Fizycy zwykle określają te parametry jako **stałe przyrody**, ponieważ wydają się one niezmiennie w większości obserwowanego wszechświata. Po wprowadzeniu tych stałych teoria zapewnia niezwykle udany opis wszystkiego, co wiemy o zachowaniu widzialnej materii. W istocie model standardowy jest jak dotąd najlepiej przetestowaną teorią fizyczną w historii. Niektóre jego przewidywania zostały zweryfikowane z dokładnością co najmniej do czternastego miejsca po przecinku!

Można się jednak zastanawiać, czy nie istnieje głębsza, nieodkryta jeszcze zasada określająca wartości parametrów, na których opierają się ogromne sukcesy modelu standardowego. Na podstawie tego, co wiemy, masa bozonu Higgsa może się nam wydawać nienaturalnie mała, ale być może jej wartość wynika z wyższych prawd matematycznych. A może stałe nie są tak naprawdę tymi samymi stałymi liczbami w całym wszechświecie. Może ewoluują bardzo powoli w ramach ewolucji kosmologicznej? A może zmieniają się od jednego kosmicznego regionu do drugiego, dając początek wszechświatom wyspowym z niestandardowymi modelami fizyki cząstek?

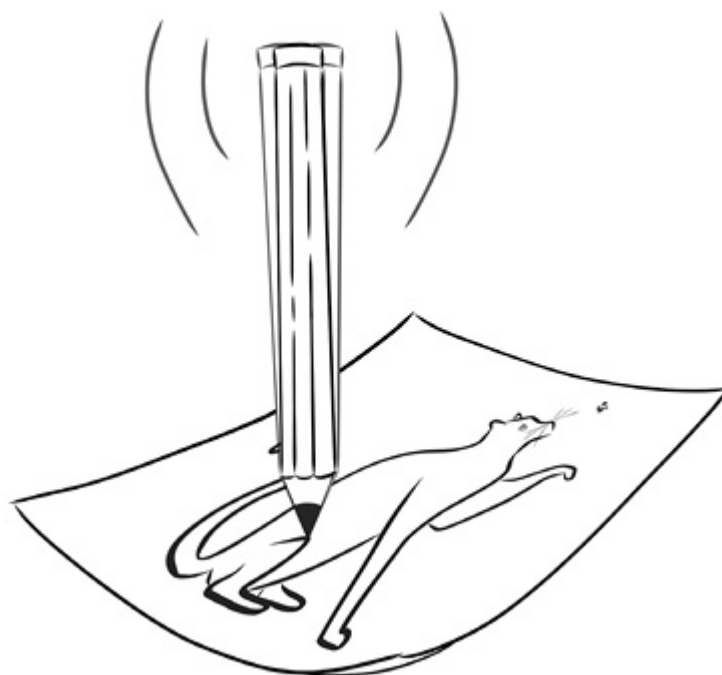
Mechanizm, dzięki któremu pole Higgsa nadaje cząstkom masę, jest początkiem odpowiedzi. Sposób obdarzania ich masą pokazuje, że siła tego pola nie jest czymś danym przez Boga, ale wynikiem dynamicznego procesu, kiedy wszechświat zaczął się rozszerzać i ochładzać w następstwie gorącego Wielkiego Wybuchu. I co najważniejsze, proces ten obejmuje złamanie abstrakcyjnej symetrii matematycznej.

Dobrze znanym zjawiskiem jest złamanie symetrii układów fizycznych podczas ich ochładzania. Weźmy pod uwagę przejście ciekłej wody w lód, gdy temperatura spadnie poniżej zera stopni Celsjusza. Woda w stanie ciekłym jest taka sama we wszystkich kierunkach: ma symetrię obrotową. Natomiast

kryształki lodu mają regularne struktury geometryczne, które łamią symetrię obrotową wody. Innym klasycznym przykładem są magnesy. Magnetyczne właściwości żelaznej sztabki całkowicie się zmieniają, jeśli schłodzimy ją poniżej temperatury krytycznej Curie, wynoszącej 770 stopni Celsjusza. W temperaturach powyżej punktu Curie fluktuujące pola magnetyczne poszczególnych atomów w gorącej sztabce żelaza przyjmują losowe kierunki. W tych okolicznościach pole magnetyczne poza sztabką wynosi zero, odzwierciedlając symetrię obrotową wyjściowej siły elektromagnetycznej. Jednak gdy żelazo ulega powolnemu schłodzeniu poniżej temperatury Curie, spontanicznie formują się domeny z wypadkowym polem magnetycznym, tworząc jakościowo inny stan charakteryzujący się złamaną symetrią obrotową, z magnetycznym biegunem północnym ustawionym w określonym (losowym) kierunku.

Jest to zjawisko ogólne. Symetrie układów fizycznych ulegają złamaniu, kiedy temperatura spada, prowadząc do bogatszych struktur i większej złożoności. Pole Higgsa nie jest wyjątkiem. Reaguje ono na temperaturę podobnie jak zwykła materia. Bezpośrednio po ultragorącym Wielkim Wybuchu, kiedy wszechświat był sto milionów razy gorętszy niż temperatura w jądrze Słońca, pole Higgsa drgało na wszystkie strony i dawało wypadkową równą zero, podobnie jak namagnesowanie żelaznego pręta powyżej punktu Curie. W tym wypadkowym zerowym polu Higgsa przenikającym nowo narodzony wszechświat wszystkie cząstki miały zerową masę — był to wysoce symetryczny stan. Jednak wraz z obniżeniem temperatury pole Higgsa przeszło przemianę. Około 10^{-11} sekundy po Wielkim Wybuchu, gdy temperatura spadła poniżej 10^{15} stopni, drgania cieplne pola Higgsa straciły wiele ze swej mocy, a zamiast tego jego zachowanie zostało zdominowane przez oddziaływania z samym sobą. Te ostatnie podlegają krzywej energii pola, ilości energii, jaką ono zawiera dla różnych wartości pola. Ale podobnie jak pole inflatonowe (zob. il. 27), krzywa energii pola Higgsa osiąga szczyt, gdy pole ma wartość zero, i jest niższa przy niezerowej wartości pola. Zatem

w wyniku ekspansji i chłodzenia wysoce symetryczne, zerowe pole Higgsa nagle znalazło się w stanie niestabilnym, podobnie jak ołówek ustawiony na czubku. Ilustracja 34 przypomina nam o tym, że ołówek szybko zamieni symetrię na stan stabilny, przewracając się i losowo wybierając konkretny kierunek. Podobnie zerowe pole Higgsa gwałtownie się zagęściło, w całości przechodząc do energetycznie korzystnego stanu o wartości niezerowej. To właśnie w tym łamiącym symetrię przejściu do niezerowej wartości pole Higgsa nadało cząstkom masę, stawiając ważny krok na długiej drodze ku pojawieniu się złożoności.



II. 34. Zaostrzony ołówek ustawiony na czubku zachowuje symetrię ziemskiego pola grawitacyjnego działającego pionowo w dół. Jednak ten symetryczny stan jest niestabilny, więc ołówek szybko upadnie. Końcowy stan poziomy ołówka jest stabilny, ale łamie symetrię wyjściowego pola grawitacyjnego. Unifikujące teorie fizyki cząstek elementarnych sugerują, że w podobny sposób przyjazne życiu prawa fizyki cząstek odzwierciedlają stan złamanej symetrii, który stopniowo i losowo zastygał, gdy wszechświat rozszerzał się i ochładzał w następstwie gorącego Wielkiego Wybuchu.

Co więcej, zmniejszenie symetrii wywołane zagęszczającym się polem Higgsa jest również tym, co spowodowało zróżnicowanie sił słabych i elektromagnetycznych. Kiedy wartość pola Higgsa wynosiła zero, nie tylko cząstki materii były bezmasowe; cząstki pośredniczące przenoszące słabe oddziaływania jądrowe również nie miały masy. Sheldon Glashow, Steven Weinberg i Abdus Salam, pionierzy modelu standardowego, odkryli, że w tym bezmasowym, wysokotemperaturowym stanie na procesy fizyczne nie miałyby żadnego wpływu poszczególne wymiany fotonów z cząstkami pośredniczącymi w słabych oddziaływaniach jądrowych. Oznacza to, że oddziaływanie słabe byłoby dalekosiężne i nie do odróżnienia od siły elektromagnetycznej. Istniałaby matematyczna symetria wiążąca oba oddziaływania, łącząca je w jedną zunifikowaną **siłę elektrosłabą**. Ale kiedy temperatura pierwotnego wszechświata spadła dzięki łamiącemu symetrię przejściu pola Higgsa, jednolite oddziaływanie elektrosłabe rozdzieliło się na słabą siłę jądrową krótkiego zasięgu i elektromagnetyczną siłę dalekiego zasięgu.

Tak więc obraz sugerowany przez model standardowy fizyki cząstek elementarnych, zastosowany do tygła gorącego Wielkiego Wybuchu, wygląda tak, że wszechświat nie narodził się z wartościami mas cząstek i oddziaływań, które mamy dzisiaj. Natomiast są one właściwościami stanu o złamanej symetrii, który okrzepł dopiero, gdy wszechświat rozszerzył się i ochłodził po gorącym Wielkim Wybuchu. Jest to doniosły wniosek. Mówi nam, że w najwcześniejszych etapach ekspansji kosmicznej niektóre podstawowe struktury praw fizycznych **współewoluowały** wraz z wszechświatem, którym rządziły. Fizycy mówią, że znane prawa fizyki cząstek elementarnych są **prawami obowiązującymi** — zasadami, które działają tylko w środowisku o stosunkowo niskiej energii i temperaturze.

Jest w istocie niezwykle, że możemy odkryć i wykorzystać obowiązujące prawa fizyki nawet bez wiedzy o tym, co się dzieje na mniejszych

odległościach i przy wyższych energiach. W tym zakresie hierarchiczna, warstwowa struktura natury znów sprawdziła się bez zarzutu. Możemy na przykład opisać makroskopowe zachowanie wody za pomocą równania hydrodynamicznego, które modeluje ją jako jednolity płyn, ignorując skomplikowaną dynamikę jej cząsteczek H_2O . Możemy też opisać zachowanie wiązki protonów i neutronów przy energiach poniżej gigaelektronowoltów za pomocą uproszczonej teorii cząstek, która nie uwzględnia faktu, że składają się one z trzech kwarków. Wiele sukcesów fizyki w przeszłości opierało się na tym sprytnym rozdzieleniu skal. Służy to również jako realne ostrzeżenie przed skalą kłopotów, w jakie wpadamy, gdy próbujemy włączyć grawitację w ujednoczone ramy i stajemy w obliczu ograniczeń tej wyraźnie warstwowej struktury.

Oczywiście dokładna forma obowiązujących praw powstałych w tej najstarszej warstwie ewolucji — ukrytej głęboko w gorącym Wielkim Wybuchu — niesie najbardziej fundamentalne konsekwencje. Wyobraźmy sobie, że gęstniejące pole Higgsa osiągnęło nieco inną wartość. Wtedy też masy cząstek byłyby inne. Jednak nawet niewielkie ich zmiany miałyby daleko idące konsekwencje, często uniemożliwiając istnienie stabilnych atomów, zagrażając istnieniu chemii — i po raz kolejny zdolności wszechświata do zamieszkania.

W ramach modelu standardowego możemy być spokojni: wypadkowy wynik łamiącego symetrię przejścia pola Higgsa jest uniwersalny. Tak, to pole może stoczyć się ze swej krzywej energii na różne sposoby, podobnie jak ołówek na ilustracji 34 może upaść w różnych kierunkach. Jednak jego ostateczna wartość, a co za tym idzie masa cząstek, zawsze jest taka sama. Ale model standardowy to tylko część obrazu fizyki cząstek elementarnych. Po pierwsze, łączy oddziaływania silne i elektroślabe tylko z grubsza. Po drugie, model standardowy nie uwzględnia ciemnej materii, która stanowi 25 procent całkowitej masy i energii dzisiejszego wszechświata i może równie dobrze zawierać wiele innych rodzajów cząstek i sił. Wreszcie model

standardowy pomija ciemną energię i grawitację, czyli zakrzywienie czasoprzestrzeni.

Wszystko to sugeruje, że pozostało jeszcze sporo miejsca na bardziej unifikującą prostotę i symetrię, gdy prześledzimy historię wszechświata do jeszcze wcześniejszych momentów. Chociaż wkraczamy teraz na bardziej spekulatywny grunt, jest prawdopodobne, że mechanizm łamania symetrii rozdzielający oddziaływanie elektroslabe w modelu standardowym działa bardziej ogólnie i że jeszcze więcej znanej struktury w obowiązujących prawach fizycznych może zniknąć, gdy przejdziemy do wyższych temperatur i wcześniejszych czasów.

Weźmy pod uwagę samo istnienie cząstek materii. Obserwowany wszechświat zawiera około 10^{50} ton materii, ale prawie nie ma antymaterii. Jest to kolejna z jego sprzyjających życiu właściwości, ponieważ gdyby rozszerzający się wszechświat wyłonił się z równą ilością każdej z nich, to wszystkie cząstki szybko by anihilowały ze swoimi antycząstkami, pozostawiając po sobie rozbłysk wysokoenergetycznego promieniowania gamma i całkowicie eliminując materię, która mogłaby tworzyć galaktyki. Ale gdy LHC wytwarza materię w wysokoenergetycznych zderzeniach, kreuje taką samą ilość antymaterii. Jak więc wszechświat wyłonił się z ognistych narodzin z nadmiarem 10^{50} ton materii? Coś musiało złamać symetrię między materią a antymaterią we wczesnym wszechświecie, nieznacznie przechylając szalę na korzyść powstawania cząstek zamiast antycząstek.

Takie hipotetyczne mechanizmy łamania symetrii i związane z nimi odpowiedniki pola Higgosa są częścią rozszerzeń modelu standardowego znanych pod nazwą **teorii wielkiej unifikacji** lub GUT (Grand Unified Theories), ponieważ łączą oddziaływanie elektroslabe z silnym oddziaływaniem jądrowym w wielkim schemacie unifikacyjnym. Skutkiem tego teorie GUT są w dużej mierze definiowane przez ich symetrie. To podejście sięga Einsteina, który w 1905 roku użył zasady symetrii wiążącej przestrzeń i czas jako podstawy swej szczególnej teorii względności

czasoprzestrzeni. Lorentz narzekał, że Einstein po prostu założył to, co on i inni próbowali wywnioskować, ale historia stanęła po stronie Einsteina. Od czasów Einsteina abstrakcyjne symetrie matematyczne stały się powszechnie akceptowane jako istotny fundament teorii fizycznych.

W warunkach kosmologicznych teorie GUT przewidują, że gdybyśmy cofnęli się do niezwykle wysokich temperatur, wiele miliardów razy wyższych od temperatury w jądrze Słońca, oddziaływania elektroslabe i silne jądrowe byłyby zasadniczo jedną i tą samą siłą i pojawiłaby się idealna symetria między materią a antymaterią. Ale typowe teorie GUT pozwalają na niewielki stopień mieszania oddziaływań składowych w swych unifikujących ramach. Jedną z konsekwencji takiego mieszania byłoby to, że pozyton, antycząstka elektronu, mógłby się przekształcić w proton. Nawet jeśli tego rodzaju przemiany byłyby niezwykle rzadkie, takie mieszanie umożliwiłoby wytworzenie niewielkiego nadmiaru materii nad antymaterią w przemianie, która mogłaby złamać pierwotną symetrię GUT, kiedy wszechświat się ochłodził. W tym scenariuszu cała antymateria uległaby następnie anihilacji z materią w gęstym pierwotnym gazie, zalewając wszechświat fotonami o wysokiej energii. Pozostałaby jednak niewielka resztką materii, nie większa niż jedna część na miliard, z której po pewnym czasie powstałoby około 10^{50} ton materii, z której jesteśmy zbudowani my i niemal wszystko inne na Ziemi. Z kolei te fotony stałyby się dziś mikrofalowym promieniowaniem tła, zimnym i słabym śladem największego wydarzenia anihilacji w kosmicznej historii.

Oczywiście teorie wielkiej unifikacji nie są tak dobrze rozwinięte jak model standardowy. Zniechęcające skale energii, w których mogłyby się pojawić podstawowe symetrie, leżą daleko poza zasięgiem nawet LHC. Nie możemy też określić na podstawie naszych skąpych obserwacji kosmologicznych z tamtej odległej epoki, która z wielu możliwych teorii GUT opisuje ultragorący Wielki Wybuch. Ale jeśli szerokie zasady symetrii, na których się

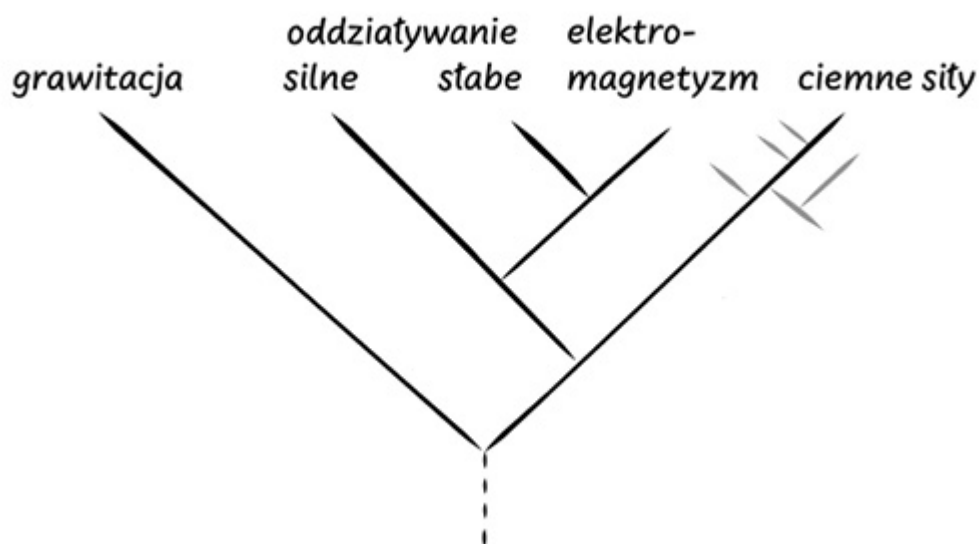
opierają, okazały się poprawne, to możemy oczekiwać, że niektóre z najbardziej podstawowych właściwości świata fizycznego, takie jak istnienie masy i materii, nie są pierwotnymi prawdami matematycznymi, lecz wynikiem wielu łamiących symetrię przejść, które stopniowo przekształcały pierwotną symetrię w podstawę dla złożoności.

Na tym nie koniec. Nawet podstawowe rozróżnienie między cząstkami i siłami może zniknąć w palącym żarze Wielkiego Wybuchu. W 1974 roku fizycy Julius Wess i Bruno Zumino założyli, że może istnieć bardzo ogólna symetria, którą nazwali supersymetrią, łącząca nie tylko różne pola sił, lecz też pola sił z polami materii. Jeśli ich koncepcja ma sens, to rozróżnienie między cząstkami sił i cząstkami materii również może pochodzić z kolejnych przejść analogicznych do bozonu Higgsa. Mogłyby złamać początkową supersymetrię, być może wytwarzając po drodze cząstki ciemnej materii oddziałujące za pośrednictwem sił wykraczających poza znaną czwórkę.

Ogólna tendencja jest tutaj jasna: nasze najlepsze unifikujące kwantowe teorie fizyki cząstek mówią nam, że gdy wszechświat ochładzał się po ultragorącym Wielkim Wybuchu, podczas pierwszego ułamka sekundy różne matematyczne symetrie mogły zostać spontanicznie złamane, wywołując serię przejść, które stopniowo wytworzyły ustrukturyzowany zestaw praw obowiązujących w niskich temperaturach. W ten sposób odkrywamy zaskakujący, głębszy poziom ewolucji, swego rodzaju **m e t a e w o l u c j ę**, w której same fizyczne prawa ewolucji ulegają zmianom i przeobrażeniom. Ilustracja 35 przedstawia tę kaskadę przejść — niektóre zostały zweryfikowane, wiele pozostaje jednak hipotetycznych — które mogły przekształcić idealnie jednorodne i symetryczne początki wszechświata w zróżnicowane środowisko fizyczne, które ostatecznie ewoluowało w taki sposób, aby sprzyjać powstawaniu życia.

Te niezwykle spostrzeżenia wskrzeszają dawną koncepcję wysuniętą przez Paula Diraca, który już w latach trzydziestych XX wieku snuł domysły, że prawa fizyczne nie są stałymi i niezmiennymi prawdami odciśniętymi we

wszechświecie w chwili jego narodzin niczym pieczęć. „Na uwagę zasługuje jeszcze jeden punkt związany z nową kosmologią” — stwierdził Dirac. „Na początku czasu prawa natury prawdopodobnie bardzo różniły się od tego, czym są teraz. Powinniśmy więc uznawać owe prawa za zmieniające się nieustannie wraz z epoką”⁴. Osiemdziesiąt lat później zaproponowane przez fizyków unifikujące teorie cząstek — zastosowane w warunkach kosmologicznych — są ucieleśnieniem idei Diraca ewoluujących praw, a element losowy w ich łamiących symetrię przejściach stanowi samo sedno naszych wysiłków, aby lepiej zrozumieć, dlaczego obserwowane prawa są takie, jakie są.



II. 35. Drzewo praw fizycznych wyrosło z wielu przejść łamiących symetrię w gorącym Wielkim Wybuchu. Unifikujące teorie cząstek przewidują, że ta najstarsza warstwa ewolucji mogła wyglądać całkowicie inaczej.

Tymczasem jest jeszcze jedna kluczowa kwestia. Bardziej ambitne teorie wielkiej unifikacji, które mogłyby obowiązywać przy najwyższych energiach, nie określają jednoznacznie wyniku tej pierwotnej ewolucji. Wręcz przeciwnie, najpoważniejsze z tych teorii przewidują, że istnieje wiele różnych sposobów łamania symetrii, co prowadzi do pojawienia się różnych praw przy niskich temperaturach, zanim wszechświat osiągnął wiek ułamka

sekundy. Sugeruje to, że właściwości cząstek modelu standardowego i ciemnej materii, które miały decydujący wpływ na wszechświat i jego późniejszą ewolucję, nie są jednoznacznie określone przez matematykę stojącą za GUT, lecz odzwierciedlają przynajmniej częściowo konkretny wynik najwcześniejszej historii wszechświata.

Taki stan rzeczy jest doskonale znany z ewolucji biologicznej. Życie zbudowało swoją zdumiewającą złożoność na niewyobrażalnie dużej liczbie zamrożonych przypadków w całej swej historii. Od funkcjonalności poszczególnych organizmów poprzez cechy gatunków po taksonomię drzewa życia wzorce w biologii przypominające prawa przechowują wyniki niezliczonych przypadkowych zdarzeń, które w ciągu miliardów lat we współewoluującym środowisku umożliwiły pojawienie się kolejnych warstw złożoności. Niektóre prawa świata ożywionego można nawet przypisać przypadkowym zdarzeniom łamiącym symetrię i przypominającym kosmiczne przejścia, które omówiliśmy powyżej. Często cytowanym przykładem jest orientacja helikalnej struktury DNA. Wszystkie znane formy życia na Ziemi mają cząsteczki DNA skręcone w prawo. Ta uniwersalna prawoskrętność jest niezwykła, ponieważ prawa elektromagnetyzmu, na których opiera się chemia molekularna, traktują lewoskrętne i prawoskrętne DNA zupełnie jednakowo — symetrycznie. Dlatego życie kwitłoby równie bujnie, gdyby opierało się na lewoskrętnym DNA. Choć istnieją różne szalone hipotezy, to możliwe jest, że około 3,7 miliarda lat temu, kiedy pojawiło się życie, przypadkowe zdarzenie spowodowało, że rozpoczęło się ono z prawoskrętnym DNA i że gdy nastąpiło to łamiące symetrię zdarzenie, ta określona konfiguracja molekularna stała się częścią jego podstawowej architektury — prawa życia na Ziemi.

W podobny sposób — według teorii GUT — wiele właściwości obowiązujących praw fizyki ma swoje korzenie w przypadkowych zwrotach akcji na najwcześniejszych etapach ewolucji wszechświata, które następnie zostały zamrożone jako część jego fizycznego planu. Składnik losowy pojawia się tu, ponieważ prawa fizyki cząstek są kwantowomechaniczne, a mechanika

kwantowa nie jest deterministyczna. Przypadkowe przeskoki kwantowe pól w bezpośrednim następstwie Wielkiego Wybuchu wpływają na szczegółowy przebieg procesu łamania symetrii. Tak jak stygnąca żelazna sztabka wytwarza pole magnetyczne w przypadkowym kierunku lub ołówek przewraca się w przypadkową stronę, w dokładnie taki sam sposób różne kosmiczne przejścia prowadzące pola do zagęszczenia w splot odrębnych sił i cząstek zawierały nieunikniony element przypadku.

Nie wszystko jest jednak możliwe. Wynika to stąd, że pola we wczesnym wszechświecie przeplatają się ze sobą: zmiany w jednym polu wpływają na inne i tak dalej. To wzajemne powiązanie, które ostatecznie można wywieść od wspólnego pochodzenia pól, ogranicza przestrzeń możliwych ścieżek. W związku z tym w najwcześniejszych etapach ewolucji wszechświata mogło istnieć wzajemne oddziaływanie zmienności i doboru. Przypominało ono darwinowski proces — przypadek kontra konieczność — rozgrywający się na najniższym poziomie praw fizyki.

W rezultacie oczywiście reguły kosmicznej gry, owe prawa, według których działa dzisiaj fizyczny wszechświat, mogły się okazać bardzo odmienne. Równie dobrze mogło istnieć sześć rodzajów neutrin zamiast trzech lub cztery rodziny fotonów albo silne oddziaływanie między widzialną a ciemną materią, dzięki czemu powstałyby wszechświaty, które byłyby niewyobrażalnie różne od naszego. Wielka unifikacja i jej jeszcze większe superrozszerzenia prowadzą do oszałamiającego wniosku, że względne siły oddziaływań cząstek, ich masy i rodzaje, a być może nawet samo istnienie materii i sił nie są matematycznymi prawdami wykutymi w kamieniu, lecz relikdami pradawnej i w dużej mierze ukrytej przed naszymi oczami epoki u zarania kosmogenezy.

Możemy jednak powiedzieć, że to darwinowskie rozgałęzienie fizyki wydarzyło się w (mniej niż) mgnieniu oka i w niezwykle prymitywnym środowisku. Tymczasem życie na Ziemi ewoluowało przez miliardy lat w złożonej biosferze naszej planety, która sama w sobie stale ulegała przeobrażeniu.

To prawda. W ciągu jednej miliardowej sekundy podczas ekspansji poinflacyjnej, kiedy wszechświat ochłodził się do przyjemnego miliarda stopni, forma obowiązujących praw fizyki w zasadzie się ustaliła. Można by pomyśleć, że nie pozostawia to wiele miejsca na jakikolwiek darwinowski proces. Jednak w przypadku wykuwania się obowiązujących praw liczy się nie tyle czas trwania, ile zakres temperatur, przez który układ przechodzi. Zakres ten jest oczywiście ogromny we wczesnym wszechświecie, co prowadzi do licznych przejść, a tym samym dużych możliwości ich sumarycznych wyników losowych w zakresie kształtowania fizyki i kosmologii w niższych temperaturach.

Ile więc mamy możliwości do dyspozycji? Jaka jest równowaga między zmiennością a doborem, jeśli chodzi o podstawowe prawa fizyki? Powszechnie wiadomo, że zakres zmienności w biologii jest fantastycznie duży. Liczba genów, które można opisać matematycznie, nie mówiąc już o ich możliwych sekwencjach w DNA, jest dużo, dużo większa niż dowolna inna znana nam liczba, a tylko niewielka część z tych kombinacji jest urzeczywistniana przez ziemskie życie. Ta olbrzymia przestrzeń konfiguracyjna oznacza, że w biologii zwycięża przypadek — w przeważającej mierze — i że ewolucja biologiczna jest silnie rozbieżnym zjawiskiem. Ilość informacji zawartych w drzewie życia wyrastającym z zamrożonych przypadków podczas całej ewolucji znacznie przewyższa to, co wynika bezpośrednio z chemii i fizyki. To właśnie skłoniło Goulda i innych do stwierdzenia, że gdybyśmy byli w stanie cofnąć zegar i ponownie przeprowadzić ewolucję biologiczną, otrzymalibyśmy zupełnie inne drzewo życia.

Lecz czy po gorącym Wielkim Wybuchu istnieje równie szerokie pole do działania? Czy struktura rozgałęzionego drzewa praw fizycznych przedstawiona na ilustracji 35 jest przede wszystkim podyktowana głębokimi matematycznymi symetriami w jej korzeniach, czy też w większości

ukształtowana została przez historyczne przypadki? W oczywisty sposób to kluczowa kwestia dla dążeń kosmologów multiświata.

Aby dobrze zrozumieć tę całą gamę możliwości, musimy przejść w naszej podróży ku unifikującym ramom o jeden ostatni krok dalej i uwzględnić grawitację.

Jak już wspomniałem, rozszerzenie wielkiej unifikacji o grawitację stawia wyzwania o zupełnie innej skali. Po pierwsze, ogólna teoria względności Einsteina opisuje grawitację w kategoriach sztywnego pola klasycznego — struktury czasoprzestrzeni — podczas gdy model standardowy i GUT mówią o oscylujących polach kwantowych. Wydaje się zatem, że zunifikowana teoria wymaga kwantowego opisu grawitacji i czasoprzestrzeni. To właśnie, przynajmniej w przybliżeniu, zapewnia euklidesowe podejście Stephena do kwantowej grawitacji, ale geometrie z czasem urojonym, na których się opiera, odzwierciedlają tylko niektóre właściwości kwantowych aspektów grawitacji. Na przykład mają problem z wyjaśnieniem natury mikroskopijnych kwantów, z których zbudowana jest czasoprzestrzeń. Co więcej, zastosowanie pól kwantowych okazało się niewystarczające do uzyskania pełnego kwantowego opisu grawitacji. Dzieje się tak, ponieważ fluktuacje kwantowe czasoprzestrzeni rosną bez ograniczeń przy coraz mniejszych skalach. Mikroskopijne fluktuacje czasoprzestrzeni wywołują samonapędzający się proces coraz bardziej szalonych oscylacji, które niszczą własną podstawową strukturę. I w przeciwieństwie do innych pól, które falują na ustalonym tle przestrzeni i czasu, grawitacja **jest** czasoprzestrzenią. To jest sedno trudności prób pogodzenia grawitacji z teorią kwantową.

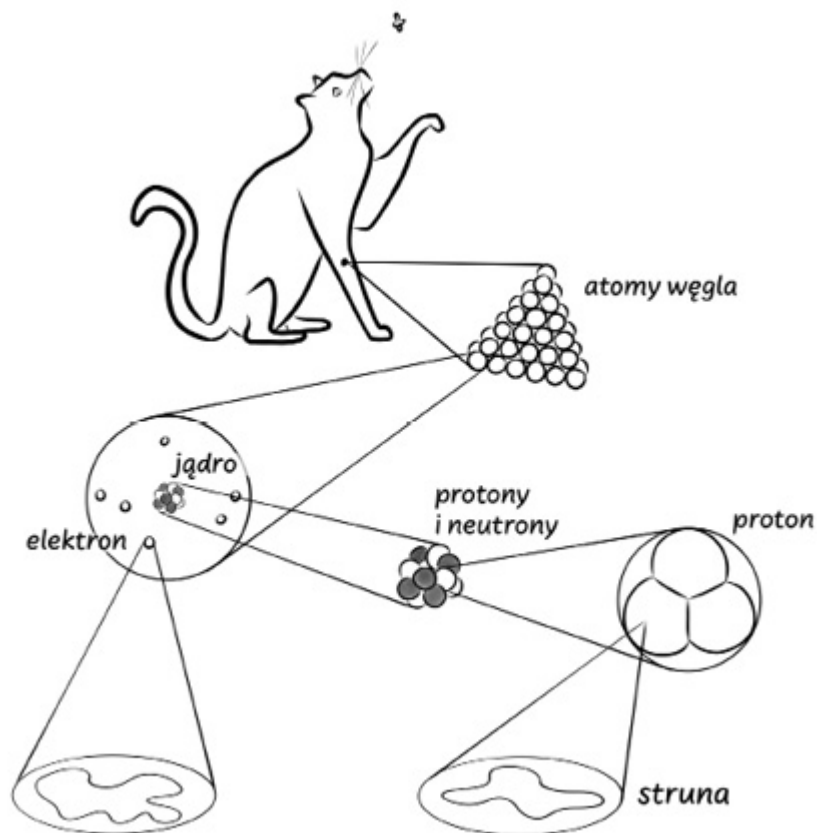
I tutaj pojawia się teoria strun. W połowie lat osiemdziesiątych teoretycy odkryli ekscytujący nowy sposób sformułowania kwantowej teorii grawitacji poprzez zastąpienie cząstek punktowych strunami jako podstawowymi składnikami rzeczywistości fizycznej. Główne założenie teorii strun mówi, że gdybyśmy analizowali materię w coraz mniejszych skalach, znacznie

mniejszych niż najmniejsze odległości, jakie możemy osiągnąć za pomocą najpotężniejszych akceleratorów cząstek, znaleźlibyśmy ukryte głęboko we wszystkich cząstkach maleńkie drgające włókna energii — które fizycy nazwali **s t r u n a m i**.

Struny dla teorii strun są tym, czym dla starożytnych Greków były atomy: niepodzielnymi i niewidzialnymi obiektami. Jednak w przeciwieństwie do greckiej koncepcji atomów, wszystkie struny w teorii strun są równe. Dokładnie ten sam rodzaj struny kryje się we wszystkich typach cząstek. Ta równość z pewnością doskonale pasuje do filozofii unifikacji, ale możemy się zastanawiać, w jaki sposób poszczególne rodzaje cząstek mogły uzyskać swoją odrębną tożsamość, od określonych mas i spinów po ładunki elektryczne lub kolory, skoro wszystkie są zbudowane z tego samego rodzaju struny. Według teorii strun odpowiedź brzmi, że struny mogą drgać w różny sposób. Twierdzi ona, że elektrony i kwarki, a nawet cząstki sił, takie jak fotony, pojawiają się z odrębnych wzorców drgań jednego rodzaju struny. Podobnie jak różne częstotliwości drgań struny wiolonczeli wytwarzają różne dźwięki, tak teoria strun przewiduje, że drgania uniwersalnego, przypominającego nic obiektu na wiele różnych sposobów tworzą zbiór różnych rodzajów cząstek.

Co najważniejsze, pionierzy teorii strun odkryli, że w jednym ze swych modów drgań struna ma dokładnie takie właściwości, jakich potrzebuje pojedynczy kwant grawitacji — **g r a w i t o n**. Co więcej, rozmazując punkty w drgające włókna, teoria strun ujarzmia kłopotliwe kwantowe fluktuacje czasoprzestrzeni rosnące na supermałych skalach. Tak naprawdę w teorii strun nie ma supermałych skal, jak pokazuje to diagram Feynmana na ilustracji 37. Diagram ten opisuje rozproszenie dwóch kwantów grawitacji w teorii strun. Widzimy, że nie jest możliwe dokładne określenie miejsca, w którym oddziałują ze sobą dwa pierścieniowate grawitony. To tak, jakby niepodzielne, strunowe cegiełki wyposażały mikroświat w minimalną skalę długości, poniżej której przestrzeń jest wewnątrznie rozmyta. Ta dodatkowa

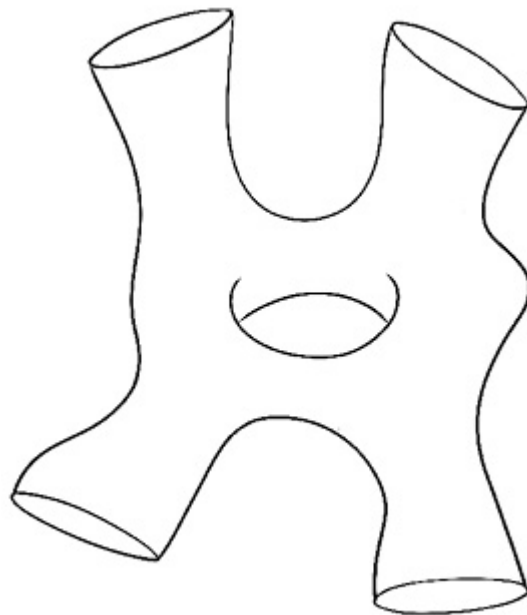
warstwa nieoznaczoności odgrywa kluczową rolę w zapobieganiu przez teorię strun wymknięciu się spod kontroli mikroskopijnych fluktuacji czasoprzestrzeni.



II. 36. Teoria strun przewiduje, że mikroskopijne elementy budulcowe materii nie są cząstkami, ale małeńkimi drgającymi włóknami energii — strunami.

Co ciekawe, to dodatkowe rozmycie rozciąga się nawet na kształt czasoprzestrzeni. Relatywistyczna czasoprzestrzeń z pewnością może być odkształcana i zakrzywiana, ale teoria strun idzie dalej i mówi, że geometria czasoprzestrzeni nie jest jednoznacznie ustalona, do tego stopnia, że nawet całe wymiary przestrzeni mogą się pojawiać lub znikać. **Jaka jest geometria czasoprzestrzeni?** — pytamy w teorii względności. Zgodnie z teorią strun odpowiedź brzmi, że to zależy od naszej perspektywy. W teorii strun mogą istnieć różne kształty czasoprzestrzeni, które mimo to opisują fizycznie równoważne sytuacje. Mówi się, że takie

kształty są **dualne**, a operacje matematyczne łączące różne geometrie noszą nazwę **dualności**. Najśłynniejsza i najbardziej niesamowita dualność, znana jako dualność holograficzna, będzie głównym tematem rozdziału 7.



II. 37. Teoria strun opisuje grawitony — pojedyncze kwanty grawitacji — jako małe drgające pętle. Ten diagram Feynmana przedstawia oddziaływanie dwóch strunowych grawitonów. Widzimy, że proces rozpraszania jest rozmyty w czasie i przestrzeni. To rozmycie pomaga kontrolować krótkozasięgowe fluktuacje kwantowe czasoprzestrzeni.

Pod koniec lat osiemdziesiątych teoretycy strun byli przekonani, że oddziałujące ze sobą jednowymiarowe struny dają matematycznie poprawny opis grawitacji w mikroskali, co stało się głównym powodem popularności tej teorii. Przed pojawieniem się teorii strun grawitacja i teoria kwantów wydawały się zasadniczo sprzeczne, jak gdyby księga natury została napisana w dwóch tomach opisujących sprzeczne historie. Wraz z odkryciem teorii strun fizycy teoretyczni zyskali perspektywę na to, w jaki sposób oba główne filary dwudziestowiecznej fizyki mogą wreszcie harmonijnie ze sobą współgrać. Co więcej, oba filary w pewnym sensie **wyłączają się**

z unifikującej struktury teorii strun. Jeśli zastosujemy jej zasady do dużego i masywnego obiektu, zredukują się zasadniczo do równania Einsteina ogólnej teorii względności. Jeśli zastosujemy tę samą teorię do niewielkiej liczby niezbyt silnie drgających strun, da nam ona zwykłą teorię pól kwantowych.

Jednak nawet dzisiaj fundamentalna struktura tej teorii pozostaje trudna do zrozumienia. Gdybyśmy zadali kilku teoretykom pytanie: „Czym jest teoria strun?”, prawdopodobnie otrzymalibyśmy wiele różnych odpowiedzi. Wobec braku bezpośredniego eksperymentalnego dostępu do ultrawysokich energii, przy których mogłaby się ujawnić strunowa natura materii i grawitacji, teoretycy strun musieli w większości zastąpić dane doświadczalne maksymą Diraca, żeby „poszukać interesującej i pięknej matematyki” w celu dalszego rozwijania swych modeli. Trzeba przyznać, że w dużym stopniu teoretycy strun nie wzięli tych słów pod uwagę. Przez lata społeczność zajmująca się teorią strun rozwijała własny skomplikowany system weryfikacji, według którego można oceniać postępy — system opierający się głównie na kryteriach związanych z matematyczną spójnością ram i głębią teoretycznego zrozumienia. A to zaowocowało niezwykle innowacyjną nauką. Do tej pory dziedzina teorii strun rozwinęła się daleko poza pierwotne cele połączenia grawitacji z mechaniką kwantową. Stworzyła sieć relacji łączących szerokie spektrum gałęzi fizyki i matematyki, od fizyki nadprzewodnictwa, przez teorię informacji kwantowej, po, jak zobaczymy w rozdziale 7, kosmologię kwantową.

Jednak w przeciwieństwie do równania Einsteina ogólnej teorii względności czy równania Schrödingera i Diraca w teorii kwantowej, nie znaleziono jeszcze akceptowanego przez wszystkich pojedynczego kluczowego równania, które zawiera sedno teorii strun. Co więcej, unifikująca potęga tej teorii ma swoją cenę i jest ona niemała: aby matematyka stojąca za nią działała, struny muszą się poruszać w dziewięciu wymiarach przestrzeni (*modulo ambiguitatis*). Oznacza to, że zasady teorii strun wymagają istnienia sześciu

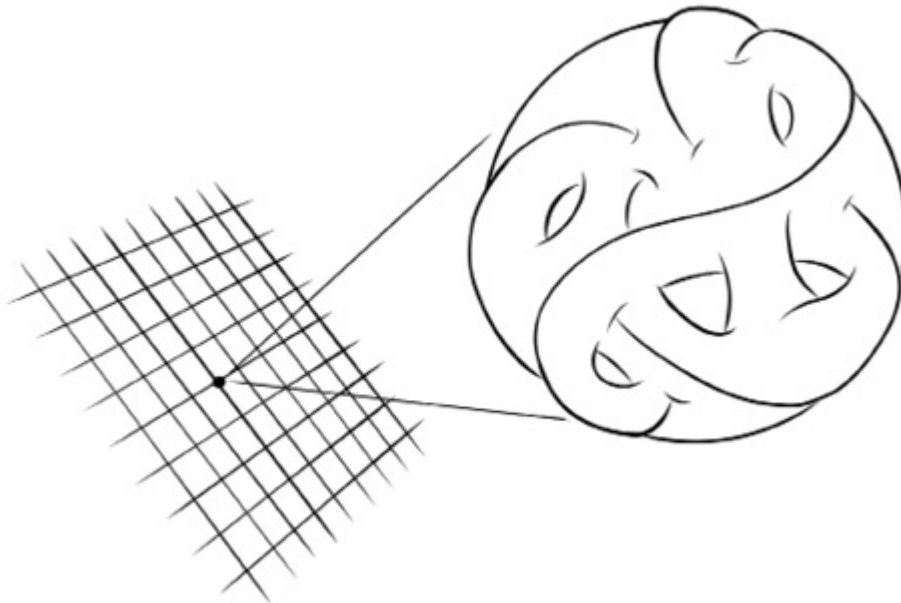
dotychczasowych wymiarów przestrzennych oprócz znanych nam (długość, szerokość i wysokość), by teoria matematycznie miała sens⁵.

Możemy się zastanawiać, dlaczego te dodatkowe wymiary nie wykluczają natychmiast tej teorii jako realnego opisu naszego świata. Z pewnością zauważylibyśmy przecież, gdyby wymiarów przestrzennych było więcej. Niekoniecznie musi to jednak być prawdą, ponieważ sześć dodatkowych wymiarów może być niezwykle małych i ciasno zwiniętych, zamiast rozciągać się na kosmiczną skalę jak trzy nam znane. Gdyby tak było, mogłoby to bardzo utrudnić wykazanie ich istnienia. Nasze codzienne postrzeganie przestrzeni przypominałoby patrzenie na słomkę do picia z dużej odległości. Słomka wygląda na jednowymiarową, nawet jeśli ma drugi kołowy wymiar, który można dostrzec tylko wtedy, gdy pije się drinka, trzymając słomkę w dłoni. Podobnie, jeśli sześć dodatkowych wymiarów jest znacznie mniejszych niż skale długości obecnie dostępne w LHC bądź każdym innym eksperymencie wysokich energii, to ich istnienie jak dotąd uszło naszej uwagi. Sześciowymiarowa kropla przestrzeni ukryta w każdym punkcie wszechświata wyglądałaby po prostu jak punkt (zob. il. 38).

Ponieważ struny są tak małe, przenikają do tego sześciowymiarowego świata. I tak jak kształt wiolonczeli wyznacza kombinację wzorców drgań określających jej wyjątkową barwę dźwięku, tak geometria sześciowymiarowych bryłek w teorii strun określa rodzaje cząstek i sił powoływanych do życia przez vibracje poruszających się strun.

W teorii strun nasz widzialny trójwymiarowy świat przypomina niewyraźne odbicie znacznie bardziej złożonej rzeczywistości wyższych wymiarów, którą poznajemy tylko pośrednio. Tak więc wyłaniający się obraz jest taki, że natura materii i forma obowiązujących praw fizycznych w trzech dużych wymiarach naszego codziennego doświadczenia — między innymi siła oddziaływań, liczba i rodzaje cząstek, zarówno widzialnych, jak i ciemnych, ich masy i ładunki elektryczne, i tak dalej, a nawet ilość ciemnej energii — zależą

w całości od tego, w jaki sposób zwinięte jest sześć małych wymiarów czających się w każdym punkcie.



II. 38. Teoria strun przewiduje, że gdybyśmy mogli gigantycznie powiększyć strukturę przestrzeni, odkrylibyśmy, że każdy punkt w znanych nam trzech dużych wymiarach składa się z małych dodatkowych wymiarów. Co więcej, kształt tej bryłki z dodatkowymi wymiarami kryjącej się w każdym punkcie wpływa na mieszankę sił i cząstek istniejących w trzech dużych wymiarach.

Ale jaka zasada wyznacza kształt tej drobnej bryłki przestrzennej odpowiadającej obserwowanemu przez nas sprzyjającemu życiu makroświatowi? Oto zagadka projektu w kuszącym krajobrazie matematycznym, który prezentuje nam teoria strun.

Pionierzy teorii strun pokładali duże nadzieje w tym, że potężna zasada matematyczna leżąca u jej podstaw wyróżni **j e d e n** wyjątkowy kształt dodatkowych wymiarów. Uważano, że dzięki teorii strun jesteśmy na dobrej drodze do wyjaśnienia kluczowych wartości liczbowych opisujących model standardowy — i składniki wszechświata — na podstawie czysto matematycznego rozumowania. Powtarzano jak mantrę, że Platon wkrótce

zostanie zrehabilitowany, a uderzająca bioprzyjazność wszechświata okaże się jedynie przypadkową konsekwencją jego sztywnych matematycznych podstaw.

Te początkowe nadzieje niebawem rozwiały się wraz z odkryciem, że podobnie jak instrumenty muzyczne, dodatkowe wymiary w teorii strun występują w ogromnej liczbie kształtów i form. W latach dziewięćdziesiątych teoretycy z przerażeniem obserwowali, jak pojawia się zdumiewająca liczba nowych sposobów na zwinięcie sześciu dodatkowych wymiarów w malutkiej bryłce. Te ukryte geometrie mogą być niezwykle skomplikowane, z wielowymiarowym labiryntem geometrycznych tuneli, pomostów i otworów, owiniętych i poprzebijanych strumieniami linii pola, a wszystko to poskładane ciasno jak origami. Na ilustracji 38 spróbowałem przedstawić przykład takiego kształtu, choć rzutowanie na dwuwymiarową płaszczyznę oznacza, że obraz ten tak naprawdę daje jedynie niejasne wyobrażenie sześciowymiarowej złożoności.

Łącząc różne składniki w swojej teorii, teoretycy strun odkryli znacznie więcej możliwych kształtów ukrytych wymiarów niż atomów w obserwowanym wszechświecie. Każdy kształt przestrzeni pozwala na uzyskanie określonego brzmienia strun, opisując wszechświat mający własny wyjątkowy zestaw obowiązujących praw. Tak więc badając matematyczny krajobraz dodatkowych wymiarów, teoretycy odkryli również oszałamiającą obfitość obowiązujących praw fizycznych w trzech dużych wymiarach dostępnych naszej obserwacji. Niektóre szczególne układy ukrytych wymiarów odpowiadają wszechświatom z prawami niemal identycznymi z naszymi, różniącymi się na przykład jedynie wartościami kilku mas cząstek i będącymi równie przyjaznymi życiu — jeśli nie bardziej. Jednak zdecydowana większość wszechświatów z dodatkowymi wymiarami jest zupełnie niepodobna do naszego, z całkowicie nieznaną mieszaniną cząstek i sił. Na przełomie wieków teoria strun stała się supermarketem praw fizycznych: można było wymyślić sobie określony wszechświat

charakteryzujący się pewnym zbiorem obowiązujących praw, a następnie znaleźć pasującą do niego konfigurację dodatkowych wymiarów. Istnieje niezliczony zbiór wszechświatów, w których odpychający efekt ciemnej energii zapobiega powstawaniu galaktyk i życia, dziwny wszechświat, w którym LHC mógłby wytworzyć czarne dziury — i Stephen otrzymałby Nagrodę Nobla — a nawet wszechświaty, w których inna liczba wymiarów przestrzennych ulega ekspansji i rośnie do dużych rozmiarów.

W kontekście kosmologicznym nadawanie kształtu dodatkowym wymiarom staje się częścią łańcucha przejść łamiących symetrie, które spowodowały pączkowanie drzewa obowiązujących praw. Również gwałtowny wzrost inflacji, w wyniku którego trzy wymiary przestrzenne uwalniają się i stają się większe, można postrzegać jako część takiego formowania wielowymiarowej rzeczywistości w następstwie narodzin wszechświata. Właściwie nawet same narodziny, w których przestrzeń mogła „ulec rozszczepieniu” na czasoprzestrzeń, noszą w sobie ślad łamania symetrii, w pewnym sensie ostatecznego. Co więcej, przeskoki kwantowe nadają temu całemu procesowi element losowości. I podczas gdy większość z nich nie pozostawia śladów, te pierwotne przejścia łamiące symetrię zostają wzmocnione i zamrożone jako składnik nowo pojawiających się obowiązujących praw. Jest to znów darwinowska rywalizacja zmienności i doboru, odbywająca się w pierwotnym środowisku bardzo wczesnego wszechświata — na najstarszym i najniższym poziomie ewolucji, jaki możemy sobie wyobrazić.

Zdumiewające spektrum sześciowymiarowych węzłów oznacza, że odpowiedź teorii strun na postawione powyżej pytanie brzmi: Zmienność i przypadek wygrywają z koniecznością. I to znacząco. Czy zatem teoria wszystkiego jest tak potężna, że niczego nie określa?

Z jednej strony fakt, że drgające struny kwantowe wytwarzają grawitację, oznacza, iż teoria strun zawiera wszystko, co potrzeba, aby zrealizować marzenie Einsteina o całkowicie zunifikowanej teorii wszystkich sił i cząstek. Co więcej, w przeciwieństwie do modelu standardowego teoria strun nie

zawiera żadnych swobodnych parametrów, które najpierw trzeba zmierzyć, żeby ten cały schemat mógł zadziałać. Z teoretycznego punktu widzenia jest to największy poziom nieskazitelności w fizyce. Z drugiej strony ta nieskazitelność pozwala tej teorii kryć w sobie oszałamiający bezlik różnych obowiązujących praw. W swojej wspaniałej książce *Ukryta rzeczywistość* Brian Greene bardzo szczegółowo opisuje ten olśniewający krajobraz matematyczny i drobiazgowo omawia co najmniej pięć bardzo różnych sposobów, w jakie zawile struktury teorii strun powodują powstanie wielu obowiązujących praw.

Z praktycznego punktu widzenia ten supermarket praw oznacza, że teoria strun nie jest prawem, lecz metaprawem. Z perspektywy czasu nie powinno to dziwić, ponieważ brak parametrów i z góry określonych struktur w unifikującej matematyce stojącej za teorią strun oznacza, że w kodowanych przez nią obowiązujących prawach musi istnieć element emergentny, a emergencja w świecie kwantowym podlega losowej zmienności.

Co ciekawe, historię wielkiej unifikacji można odczytywać na dwa sposoby, z których każdy ukazuje inną stronę tych wydarzeń.

Czytając od niskich do wysokich energii, od góry do dołu na ilustracji 35, odkrywamy opowieść o sukcesie programu unifikacji fizyki cząstek elementarnych. Podążając w kierunku coraz większych energii, napotykamy coraz więcej spajających symetrii, zawierających coraz głębsze wzorce matematyczne, które łączą obserwowane siły i cząstki, a być może nawet ciemną materię, w obejmującym coraz szersze grupy unifikującym schemacie. Jest to tradycyjny sposób rozumienia unifikacji w fizyce cząstek elementarnych i w ten sposób te idee są testowane w laboratorium. Fizycy cząstek domagają się większych akceleratorów do zderzania cząstek z coraz wyższymi energiami, by zbadać głębiej leżące symetrie unifikujące (cały czas zakładając, że próg tworzenia czarnych dziur leży jeszcze wyżej). Taka forma odczytywania podkreśla współzależności między elementami budulcowymi natury i sednem konieczności, którą ucieleśnia i stara się odkryć unifikacja.

Czytając natomiast od wysokich do niskich energii, od dołu do góry widzimy na ilustracji 35 sekwencję przejść tworzących rozgałęzioną, drzewiastą strukturę sił fizycznych i rodzajów cząstek, bardzo przypominającą drzewo życia (zob. il. 5). Jest to naturalny sposób interpretacji w kontekście kosmologicznym, gdzie ekspansja powoduje ochłodzenie, a ochłodzenie powoduje rozgałęzianie. Patrząc w ten sposób, wielka unifikacja jest w głównej mierze ogromnym źródłem zmienności, umożliwiając pojawienie się procesów mutacji i urozmaicenia praw fizycznych, podobnie jak dokonały tego gatunki biologiczne miliardy lat później.

Te sposoby czytania nie są ze sobą sprzeczne. To tylko dwie strony tej samej monety — zmienność i dobór.

Doniosłe odkrycie oszałamiającego spektrum rozgałęzionych ścieżek teorii strun miało dalekosiężny wpływ na teorię multiświata. Kosmolodzy multiświata już wcześniej zdali sobie sprawę, że wszechświaty wyspowe, czyli regiony, w których inflacja przypadkowo się skończyła i przekształciła się w gorący Wielki Wybuch, mogą się różnić strukturą i składem. Niektóre będą miały wystarczająco dużo materii, aby wytworzyć miliardy galaktyk, podczas gdy inne pozostaną prawie puste. Dzięki teorii strun zakres zmienności między wyspowymi wszechświatami wzrósł do niewyobrażalnych rozmiarów. Teoria strun przewiduje, że jeśli gdzieś istnieje podlegająca wiecznej inflacji arena, to mieści ona w sobie oszałamiającą różnorodność wszechświatów wyspowych. Każdy z nich nosiłby ślady swoich narodzin, z własną kaskadą przejść pojawiających się podczas rozszerzania i stygnięcia. Multiświat jako całość byłby naprawdę zachwycającym, różnorodnym kosmicznym gobelinem, splecionym niewidzialną ręką metapraw teorii strun.

Rozglądając się dookoła, mieszkańcy wszechświata wyspowego mogą odnieść wrażenie, że prawa fizyczne są uniwersalne, a nawet się zastanawiać — jak my — czy zostały one tak starannie dobrane, by powstało życie. Ale w zróżnicowanym multiświecie teorii strun byłoby to złudzeniem. To, co

nazywamy „prawami fizyki”, byłoby jedynie lokalnymi wzorcami, zamrożonymi relikdami odzwierciedlającymi szczególny sposób, w jaki nasz skrawek przestrzeni ochładzał się po gorącym Wielkim Wybuchu. Podobnie jak spiczaste dzioby zięb czy prawoskrętność DNA, właściwości cząstek i sił nie stanowiłyby części wielkiego projektu, byłyby jedynie cechami naszego kosmicznego otoczenia. Po prostu darwinowski proces, który dał im początek, miał miejsce bardzo, bardzo dawno temu, kryjąc w sobie ewolucyjny charakter obowiązujących praw.

Doskonale pamiętam wykład Susskinda *Antropiczny krajobraz teorii strun*⁶ wygłoszony na konferencji naukowej *Wszechświat czy multiświat* — jednej z pierwszych, która zgromadziła razem teoretyków strun i kosmologów. Spotkanie odbyło się na Uniwersytecie Stanforda w marcu 2003 roku i zostało zorganizowane przez Lindego oraz Paula Daviesa. Wśród zgromadzonych teoretyków panował entuzjastyczny nastrój. Przez lata postęp w kierunku stworzenia ostatecznej teorii w pełni zgodnej z obserwowanym światem utknął w martwym punkcie. Na tym spotkaniu Susskind odważył się wygłosić zaskakującą opinię, że te dążenia były błędne. Wyjaśnił, że teoria strun opiera się na mocnych i głębokich podstawach matematycznych, ale nie jest prawem fizycznym w zwykłym tego słowa znaczeniu. Zamiast tego powinniśmy myśleć o niej jako o metaprawie, które rządzi multiświatem niezliczonych wszechświatów wyspowych z własnymi lokalnymi prawami fizyki.

Później w tym samym roku Instytut Fizyki Teoretycznej Kavli w Santa Barbara rozpoczął swój pierwszy program kosmologii superstrun. W wypełnionym po brzegi audytorium rozpromieniony Linde wyjaśnił publiczności złożonej z teoretyków strun, w jaki sposób jego mechanizm wiecznej inflacji generującej wszechświaty (omówiony przeze mnie w rozdziale 4) może doprowadzić do powstania nieskończonego rozpowszechnienia wszechświatów wyspowych zajmujących nawet najbardziej odległe zakątki krajobrazu teorii strun, przekształcając ogromny

potencjał zmienności tej teorii w prawdziwą kosmiczną mozaikę — w multiświat.

Niepokojące okazało się jednak to, że w metaprawach teorii strun nie było niczego, co mogłoby powiedzieć nam, gdzie powinniśmy się znaleźć w tej szalonej kosmicznej tkaninie, a zatem jakiego rodzaju wszechświata powinniśmy się spodziewać wokół nas. Sam multiświat jest bezosobowy i niekompletny. Jest to paradoksalna sytuacja, którą opisałem w rozdziale 2: jako teoria fizyczna, multiświat sygnalizuje koniec dużej części przewidywalności uzyskanej dzięki fizyce.

Susskind jednak zaproponował nowy wielki ład. Argumentował, że przez połączenie multiświata z zasadą antropiczną można odwrócić ten interpretacyjny problem, ponieważ zasada antropiczna **w y b i e r a** obszar przyjazny dla życia w wieloświecie. Sama zasada antropiczna nie zalicza się w poczet nauki, lecz w połączeniu z multiświatem — ciągnął swój wywód — ma rzeczywistą zdolność predykcyjną. Susskind proponuje „antropiczną kosmologię multiświata” jako nowy paradygmat fundamentalnej fizyki i kosmologii, zastępujący tradycyjną strukturę fizyki opartą wyłącznie na obiektywnych i ponadczasowych prawach.

Z perspektywy czasu tym, co naprawdę wywołało antropiczną rewolucję w kosmologii, było niezwykle współgranie tych nowych teoretycznych wniosków pochodzących z teorii strun i świeżych obserwacji wskazujących na niewidzialną ciemną energię przenikającą całą przestrzeń. Wspomniałem wcześniej, że ku zaskoczeniu niemal wszystkich na przełomie XX i XXI wieku obserwacje astronomiczne supernowych pokazały, że od mniej więcej pięciu miliardów lat ekspansja wszechświata nabiera tempa. Teoretycy, usiłując uzyskać wyjaśnienie, wskrzesili słynny Einsteinowski człon λ , którego ciemna energia i ujemne ciśnienie powoduje odpychanie antygravitacyjne w największych skalach. Ilość ciemnej energii — czyli wartość stałej kosmologicznej λ — potrzebna do wyjaśnienia obserwowanego

przyspieszenia jest jednak niezwykle mała, mniejsza o zdumiewający czynnik 10^{-123} od tego, co wielu mogło uważać za wartość naturalną. Ta frapująca rozbieżność między tym, czego oczekujemy, a tym, co obserwujemy, ma związek z mechaniką kwantową, która przewiduje, że pusta przestrzeń powinna się roić od cząstek wirtualnych, będących fluktuacjami próżni kwantowej. Energia związana z całą tą szaleńczą aktywnością w próżni w rzeczywistości generuje stałą kosmologiczną. Lecz kiedy fizycy cząstek zsumowali wkład wszystkich cząstek wirtualnych, uzyskali absurdalnie dużą wartość λ , stałą kosmologiczną o tak obłędnej wielkości, że spowodowałyby rozerwanie wszechświata na strzępy, zanim galaktyki mogłyby zacząć się tworzyć. Tymczasem do końca lat dziewięćdziesiątych większość teoretyków zakładała, że w sercu teorii strun istnieje dotychczas nieodkryta zasada symetrii, która jednoznacznie ustalała, iż ciemna energia ma wartość zerową. Jednak odkrycie na początku nowego milenium, że teoria ta kryje w sobie rozległy multiświat, powiązane z niesamowitą obserwacją, że stała kosmologiczna nie jest wcale zerowa, pobudziło radykalną zmianę perspektywy na to, „co jest naturalne”, jeśli chodzi o λ . Poszukiwanie fundamentalnego wyjaśnienia zerowej wartości zostało szybko zastąpione przekonaniem, że ilość ciemnej energii różni się w sposób losowy w każdym wszechświecie wyspowym ogromnego i zróżnicowanego multiświata i że zasada antropiczna wybiera bardzo małą, ale niezerową wartość, którą obserwujemy.

Co ciekawe, pierwsze rozważania antropiczne w tym kontekście tak naprawdę poprzedzają wszystkie te odkrycia teoretyczne i obserwacyjne dokonane pod koniec lat dziewięćdziesiątych. Już w 1987 roku, w czasie, gdy spekulacje na temat multiświata były w dużej mierze odrzucane jako niepotrzebna metafizyka, Steven Weinberg przeprowadził niezwykle eksperyment myślowy, w którym zastanawiał się nad wartością stałej kosmologicznej z antropicznego punktu widzenia. Weinberg wyobraził sobie hipotetyczny multiświat i badał, które wszechświaty wyspowe mogą rozwinąć

sieć galaktyk. Zauważył, że warunek ten nałożył niezwykle surową górną granicę na lokalną wartość stałej kosmologicznej. W istocie wszechświaty wyspowe z odrobinę większą wartością λ , niż obserwujemy, zaczęłyby przyspieszać miliony zamiast miliardy lat po Wielkim Wybuchu, nie pozostawiając czasu na gromadzenie się materii⁷. Tymczasem bez galaktyk wszechświat byłby miejscem pozbawionym życia. Dlatego Weinberg doszedł do wniosku, że fakt naszego istnienia w naturalny sposób prowadzi nas do skupienia się na wszechświatach wyspowych z zaledwie drobnym śladem ciemnej energii, leżących w niezwykle wąskim, przyjaznym dla życia przedziale.

Z drugiej strony nie powinniśmy oczekiwać, że ciemna energia będzie znacznie mniejsza niż wymagana do naszego istnienia. Był to antropiczny akcent jego argumentacji. Weinberg założył, że jesteśmy losowo wybranymi obserwatorami żyjącymi w multiświecie wszechświatów wyspowych przyjmujących niemal wszystkie możliwe wartości λ , nawet w wąskim zakresie wartości pozwalających na powstanie życia. Ogromna większość nadających się do zamieszkania wszechświatów wyspowych miałyby wówczas gęstości ciemnej energii w pobliżu górnej granicy ustalonej przez życie po prostu dlatego, że wybór jeszcze mniejszej wartości λ wymaga zbyt precyzyjnego dostrojenia. Rozumując w ten sposób, doszedł do wniosku, że obserwowana ilość ciemnej energii nie powinna wynosić zero, jak powszechnie uważano w tamtym okresie, ale w istocie powinna być możliwie największa, o ile nie zakłóci ona procesu powstawania galaktyk. Ten wniosek doprowadził Weinberga już w 1987 roku do przewidywania, że obserwacje astronomiczne mogą pewnego dnia ujawnić, iż stała kosmologiczna nie znika, lecz przyjmuje bardzo małą, niezerową wartość. W ciągu dekady obserwacje supernowych potwierdziły, że miał rację.

Co więcej, teoria strun wydawała się dostarczać obrazu niezwykle zróżnicowanego multiświata, którego istnienie Weinberg zakładał. Tak się złożyło, że w niezwykle wąskim łańcuchu zdarzeń trójkąt obserwacji,

teoretyzowania i rozumowania antropicznego na temat λ — gdzie każdy z tych procesów był rewolucyjny na swój sposób — połączył się na początku nowego tysiąclecia. To właśnie ta zbieżność idei dała początek antropicznej kosmologii multiświata, nowemu paradygmatowi, który zapoczątkował gruntowną zmianę perspektywy kosmicznego precyzyjnego dostrojenia przyjętą przez Susskinda i innych.

Jeśli istnieje multiświat, to przypadkiem znajdą się tu i ówdzie rzadkie wszechświaty wyspowe mające lokalne prawa pasujące do pojawienia się życia. Oczywiście życie pojawi się tylko w tych wszechświatach wyspowych. Inne wszechświaty wyspowe, w których warunki nie są przyjazne życiu, pozostaną niezobserwowane, ponieważ nie możemy dokonywać obserwacji tam, gdzie nas nie ma. Zasada antropiczna dokonuje wyboru wysp nadających się do zamieszkania w multiświecie, nawet jeśli są one wyjątkowo rzadkie. Tak więc, biorąc to wszystko pod uwagę, kosmologia antropicznego multiświata wydaje się rozwiązywać odwieczną zagadkę projektu: zamieszkujemy wyjątkowy, przyjazny życiu obszar w większości pozbawionej życia kosmicznej mozaice wybranej według zasady antropicznej.

Na pierwszy rzut oka ten tok myślenia nie wydaje się zbyt różnić od sposobu, w jaki tłumaczymy efekty zwykłej selekcji w naszym obserwowanym wszechświecie. Nie możemy istnieć w rejonach wszechświata, w których gęstość materii jest zbyt niska, aby mogły powstać gwiazdy, ani w epoce przed pojawieniem się odpowiedniej ilości pierwiastków, takich jak węgiel. Zamiast tego żyjemy na skalistej planecie otoczonej atmosferą w nadającej się do zamieszkania strefie wyjątkowo stabilnego i spokojnego układu gwiazdowego wiele miliardów lat po Wielkim Wybuchu, ponieważ jest to szczególnie przyjazne biologicznie środowisko, w którym inteligentne życie miało szansę się rozwinąć. Podobnie, jak mówi antropiczna kosmologia multiświata, mamy ze swej istoty przyjazne biologii prawa fizyki jedynie dlatego, że raczej nie moglibyśmy wyewoluować we wszechświecie, w którym warunki fizyczne wykluczają nasze istnienie.

W pewnym sensie zasada antropiczna mówi, że fizykę obserwowalnego wszechświata odkrywamy taką, jaka jest, ponieważ znajdujemy się w nim.

Nie zrobiło to wrażenia na Stephenie. W pełni zgadzał się z Susskindem, Lindem i ich zwolennikami, że wyraźnie przyjazny życiu projekt wszechświata wymaga wyjaśnienia. Głęboko zaś nie zgadzał się z twierdzeniem, że antropiczna kosmologia multiświata wyjaśnia cokolwiek. W drodze powrotnej do Pasadeny po spotkaniu w Santa Barbara zatrzymaliśmy się w kubańskim klubie tanecznym w Beverly Hills, gdzie Stephen poświęcił czas przeznaczony na taniec na to, by wyrazić swoje niezadowolenie z nowej kosmologii strun. *Zwolennicy wiecznej inflacji i multiświata zaplątali się już całkiem w tym, co powinien widzieć typowy obserwator* — napisał w rytm kubańskiej salsy. *W ich mniemaniu wszyscy jesteśmy Chińczykami, więc tylko czekać na katastrofę.*

Na przełomie stuleci Stephen coraz bardziej obawiał się, że antropiczne rozumowanie w kosmologii podważyło zasady racjonalnej metody, która stanowi bijące serce nauki. Będziemy musieli zrozumieć tu pewną subtelną kwestię, ale pozostańcie ze mną, ponieważ dotarliśmy do sedna sprawy w sporze Lindego z Hawkingiem.

Podstawowy problem polega na tym, że zasada antropiczna opiera się na założeniu — zbyt często zamiatanym pod dywan — że jesteśmy typowymi mieszkańcami multiświata. To oznacza, że aby rozumować antropicznie, trzeba najpierw sprecyzować, co jest typowe, a co nie. Dokonuje się tego poprzez wyróżnienie jednej lub wielu właściwości świata fizycznego, którą uważa się za ważną dla życia. Te właściwości przekładają słowa takie jak „my”, „nas” lub „obserwator” na język fizyki. Ich powszechność — wraz ze statystycznymi właściwościami multiświata — jest następnie wykorzystywana do wnioskowania, w jakim rodzaju wszechświata wyspowego my — typowi mieszkańcy multiświata — powinniśmy się znaleźć, a zatem jakiego rodzaju fizykę możemy się spodziewać odkryć za pomocą naszych teleskopów.

Ale co stoi za wyborem tych „antropicznych” właściwości określających zbiór obserwatorów, którego mamy być typowymi, losowo wybranymi elementami? Czy powinniśmy brać pod uwagę liczbę galaktyk spiralnych, czy odsetek barionów, które tworzą galaktyki, czy też liczbę zaawansowanych cywilizacji? Wszyscy jesteśmy pod pewnymi względami bardziej typowi, a pod innymi mniej. Czy jestem typowy w tym sensie, że mieszkam w najludniejszym kraju na mojej planecie? Indyjscy czytelnicy odpowiedzą, że tak, a inni, że nie. Czy jestem typowy w tym sensie, że mieszkam w kraju, który ma cztery pory roku? Większość czytelników odpowie twierdząco, ale niektórzy nie. Ponadto istnieje ogromna liczba zbiorów, o których nie można nic powiedzieć. Czy żyjemy we wszechświecie, w którym jest najwięcej cywilizacji? Możliwe. Ale równie dobrze możemy żyć we wszechświecie, który jest pod tym względem nietypowy, ponieważ ma kilka cywilizacji, ale znacznie mniej niż inne wszechświaty. Ani obecne, ani przyszłe dane tego nie rozsądzą. Po prostu nie wiemy. I to jest problem dla antropicznej kosmologii multiświata. Ponieważ przy braku jednoznacznego kryterium, które określa **w ł a ś c i w ą** klasę odniesienia dla mieszkańców multiświata, wszystkie teoretyczne przewidywania antropicznej kosmologii multiświata stają się wieloznaczne. Ta teoria pada ofiarą osobistych wyborów i subiektywizmu. Z waszego punktu widzenia powinniśmy się znaleźć w określonym wszechświecie wyspowym, podczas gdy z mojej perspektywy wybór pada na inny wszechświat wyspowy i nie możemy poddać tego racjonalnej dyskusji na podstawie dowodów pochodzących z eksperymentów i obserwacji.

Antropiczne przewidywanie Weinberga, że powinniśmy zmierzyć małą, ale niezerową stałą kosmologiczną, stanowi dobry przykład. Bliższe przyjrzenie się tej kwestii ujawnia, że przewidywana wartość λ silnie zależy od wybranej klasy odniesienia mieszkańców multiświata. Weinberg założył, że jesteśmy typowymi mieszkańcami wszechświatów wyspowych, które różnią się zawartością ciemnej energii, ale poza tym mają dokładnie te same parametry fizyczne. Kosmolodzy Max Tegmark i Martin Rees wskazali, że gdybyśmy

zamiast tego założyli, iż zostaliśmy losowo wybrani spośród znacznie szerszego zbioru obserwatorów zamieszkujących wszechświaty wyspowe różniące się stałą kosmologiczną oraz wielkością pierwotnych zarodków galaktyk, wówczas przewidywana wartość λ byłaby tysiąc razy większa niż to, co mierzymy⁸. Bardziej kreatywne wybory klas odniesienia prowadzą do tak absurdalnych wniosków, że powinniśmy oczekiwać, iż będziemy mózgami pochodzącymi z fluktuacji próżni w pustym, wyspowym wszechświecie, ze wszystkimi naszymi wspomnieniami pojawiającymi się w formie fluktuacji ułamek sekundy wcześniej. Konkluzja jest następująca: rozumując w sposób antropiczny, zawsze można przekuć każdą porażkę w pozorny sukces lub odwrotnie, odpowiednio dobierając populację przypadkowych obserwatorów do własnych upodobań.

Tymczasem być może nie należy wymagać od kosmologii multiświata, aby była falsyfikowalna w dawnym popperowskim sensie. Natura może nie być na tyle łaskawa. Może nie istnieć niepodważalny dowód w postaci pomiaru, który pozwoliłby nam definitywnie wykluczyć całą teorię multiświata. Natomiast od teorii fizycznej wymaga się, by formułowała tego rodzaju jednoznaczne przewidywania, tak aby dalsze obserwacje i eksperymenty mogły przynajmniej potencjalnie wzmacniać nasze zaufanie do niej. Bez tego sam proces naukowy jest zagrożony. Jak każda teoria, której przewidywania opierają się na losowych rozkładach, z których można zaobserwować tylko jeden przypadek — nasz — antropiczna kosmologia multiświata nie spełnia tego najbardziej podstawowego kryterium.

Kosmolodzy nazywają to **p r o b l e m e m p o m i a r u** kosmologii multiświata. Jeśli chodzi o nasze obserwacje, brakuje nam jednoznacznego sposobu pomiaru częstości występowania różnych populacji wszechświatów wyspowych w multiświecie, a to podważa zdolność predykcyjną teorii. Ten problem pomiaru objawia się chyba najdobitniej, gdy próbujemy przewidywać obserwacje, które nie mają nic bezpośrednio wspólnego z życiem, gdyż wtedy

zasada antropiczna nie zapewnia drogi ucieczki, którą można by wykorzystać⁹.

Dotarliśmy do podręcznikowego kryzysu kuhnowskiego. Mieliśmy nadzieję, że zasada antropiczna określi, „kim jesteśmy” w kosmicznej mozaice wiecznej inflacji, że może powiązać abstrakcyjną teorię multiświata z naszymi doświadczeniami i pomiarami wykonywanymi przez nas w roli obserwatorów w tym wszechświecie. Jednak nie wprowadza „nas” do tych równań w sposób zgodny z podstawowymi zasadami naukowymi, pozostawiając tę teorię bez jakiegokolwiek mocy wyjaśniającej.

Tak naprawdę odwoływanie się do procesu losowego wyboru oraz metapraw kryje w sobie zdecydowanie nieantropiczną, boską perspektywę na sprawy kosmiczne. Dobór losowy wprowadza pogląd, że spoglądamy na kosmos niejako z zewnątrz i „wybieramy”, kim jesteśmy, spośród wszystkich obserwatorów takich jak my. Byłoby to uzasadnionym działaniem, gdybyśmy my sami lub jakiś byt metafizyczny rzeczywiście dokonali takiej operacji i byli świadomi wyniku tego doboru. Jednak nie ma na to żadnego dowodu. Błędym rozumowaniem jest zrównywanie naszego wniosku, że jesteśmy istotami ludzkimi żyjącymi we wszechświecie, z kosmicznym aktem losowego doboru¹⁰. Dlatego nie powinniśmy dokonywać przewidywań teoretycznych tak, jakbyśmy byli losowo wybrani z wytypowanego przez nas zbioru. W końcu jest całkowicie możliwe (a nawet prawdopodobne), że żyjemy we wszechświecie rządzonego prawami, które pod wieloma względami są nietypowe. W istocie właśnie tego należy się spodziewać po losowości przejść łamiących symetrię.

Istnieje obserwowany wszechświat z jego obowiązującymi prawami oraz konfiguracją gwiazd i galaktyk, czasami zawierających życie. Niezależnie od tego, czy jest on wszystkim, czy też istnieje jako część gigantycznego multiświata, sytuacja logiczna jest taka sama: nasz wszechświat, ten, który obserwujemy, wykazuje zestaw właściwości fizycznych, które są w najwyższym stopniu odpowiednie do powstania życia. Cokolwiek dzieje się

w odległych, przyczynowo niepowiązanych wszechświatach, powinno być całkowicie nieistotne dla naszych prób zrozumienia projektu tego wszechświata.

Pułapki wynikające z rozumowania na podstawie typowości są doskonale znane z innych nauk historycznych, od ewolucji biologicznej po historię ludzkości. Gdyby Darwin założył, że jesteśmy typowi, mógłby rozważyć zbiór planet podobnych do Ziemi z różnymi drzewami życia, z których wszystkie zawierają gałąź *Homo sapiens*. Mógłby następnie próbować przewidzieć, że my — ten konkretny przypadek *Homo sapiens* na planecie Ziemia — powinniśmy być częścią najpospolitszego drzewa życia spośród wszystkich możliwych drzew z gałęziami *Homo sapiens*. Czyli całkowicie zignorowałyby kluczowy wniosek, że każde rozgałęzienie wiąże się z grą losową i że znane nam drzewo życia zawiera zawiłą historię bilionów przypadkowych zwrotów akcji i miliardy lat biologicznych eksperymentów, a nie zewnętrzny akt losowej selekcji.

Ogrom możliwości w ewolucji biologicznej oznacza, że wszelkie deterministyczne wyjaśnienia przyczynowe tego, dlaczego należymy do tego konkretnego drzewa życia, jest skazane na niepowodzenie. Dlatego biolodzy działają *ex post facto*, opisując, w jaki sposób dany wynik prowadzi z powrotem do określonej sekwencji rozgałęzień. Typowość może być więc użyteczną zasadą przewodnią wyjaśniającą co najwyżej kilka najbardziej ogólnych właściwości drzewa życia.

Teoria strun przewiduje równie rozległą przestrzeń możliwych ścieżek, jeśli chodzi o pojawianie się obowiązujących praw fizycznych w następstwie Wielkiego Wybuchu — procesu kwantowego obejmującego przypadkowe przeskoki i serię przejść łamiących symetrię. W wyniku tego określony rezultat nie musi być ani typowy, ani *a priori* prawdopodobny¹¹. Jednak w odróżnieniu od współczesnej biologii antropiczna kosmologia multiświata przeciwstawia się tej przypadkowości i polega na absolutnie

deterministycznym schemacie wyjaśniającym, który stawia pytanie „dlaczego” ponad „jak”. Przypadek biologii sugeruje jednak, że daje to wadliwy fundament dla bardziej szczegółowego i spójnego zrozumienia zagadki projektu w kosmologii. Na przykład laureat Nagrody Nobla David Gross od dawna wyraża ten pogląd: „Im dłużej obserwujemy i poznajemy wszechświat, tym gorzej się ma zasada antropiczna”¹².

Teoria multiświata mówi, że cała idea ewolucji ma fundamentalne ograniczenia. Umieszczając pradawną ewolucję prowadzącą do obowiązujących praw fizyki na ustalonym tle niezmiennych metapraw, kosmologia multiświata podąża tak naprawdę za dość tradycyjnym schematem wyjaśniającym w fizyce. Zakłada on, że u samych podstaw fizyki i kosmologii znajdziemy niezmienną, ponadczasową metaprawa w postaci kluczowego równania rządzącego całością kosmicznej mozaiki, z którego będzie można obliczyć przewidywania probabilistyczne dla obserwacji przy niskich energiach, takich jak nasze. Widziany z tej najszerzej perspektywy multiświat jest zaledwie epicyklem do epistemologii Newtonowskiej, w podobny sposób, jak starożytni dodawali epicykle do epicykli, próbując uratować Ptolemuszowski model świata. Ewolucja i emergencja ostatecznie pozostają zjawiskami drugorzędnymi w kosmologii multiświata, nieco mniej fundamentalnymi. To jest właśnie sedno sporu Hawkinga z Lindem: czy u samych podstaw zwycięża zmiana, czy wieczność.

Czy to wszystko? Tego wieczoru w Beverly Hills, w następstwie zaproponowanej rewolucji antropicznego multiświata, przy kubańskim zespole grającym w tle, Stephen był gotów na dobre porzucić zasadę antropiczną. *Zróbmy to tak, jak trzeba* — powiedział. Nie zadowolając się już podważaniem teorii kosmologicznej za pomocą nienaukowej zasady, postanowiliśmy przemyśleć jej najgłębsze podstawy. Zagadka projektu musiała wciągnąć nas ku najgłębszym podstawom fizyki i byliśmy zdani tylko na siebie. Teoretycy strun zostali w innym wszechświecie.



II. 39. Stephen Hawking i autor w grocie mieszczącej detektor ATLAS w CERN w 2006 roku, z rzecznikiem prasowym projektu ATLAS, Peterem Jennim, i jego zastępcą, późniejszym dyrektorem generalnym CERN, Fabiolą Gianotti.

¹ ATLAS to skrót od nazwy detektora: A Toroidal LHC Apparatus.

² Antyproton to antycząstka protonu. Ma ładunek elektryczny -1 , w przeciwieństwie do ładunku $+1$ protonu. Paul Dirac przewidział istnienie antyprotonu w swoim wykładzie noblowskim w 1933 roku na podstawie tak zwanego równania Diraca. Antyproton został po raz pierwszy odkryty eksperymentalnie w 1955 roku w akceleratorze Bevatron w Berkeley. W dzisiejszych czasach antyprotony są nieustannie wykrywane w promieniowaniu kosmicznym.

³ Powodem jest to, że bozon Higgosa powinien również mieszać się z cięższymi, jeszcze nieodkrytymi cząstkami. To mieszanie powinno zwiększać jego masę, a wraz z nią masę wszystkiego innego. Tak jednak nie jest i pozostaje to zagadką znaną jako problem hierarchii w fizyce cząstek elementarnych. Istnieje oczywista hierarchia, ogromny rozrzut energii między stosunkowo niskimi masami i energiami cząstek elementarnych w modelu

standardowym a znacznie wyższymi skalami energii w przyrodzie, aż do skali Plancka, w której według fizyków mikroskopowe efekty grawitacji kwantowej stają się istotne. Teoretycy przypuszczali, że pewna egzotyczna symetria, nazwana supersymetrią, może być odpowiedzialna za małą masę Higgsa. Supersymetria mówi, że każda cząstka materii ma za swojego partnera cząstkę pośredniczącą, co w praktyce podwaja liczbę cząstek elementarnych. To supersymetryczne podwojenie powoduje, że różne wkłady w masę Higgsa doskonale się znoszą, dzięki czemu pozostanie on lekki. Jednak w LHC na próżno szukano tych cząstek partnerskich przewidywanych przez supersymetrię, prowadząc niektórych do powątpiewania w ich istnienie.

⁴ Cytat z jego wykładu z okazji otrzymania Nagrody Scotta. W istocie Dirac przedstawił konkretną sugestię. Zauważył, że trzy różne kombinacje kilku stałych fizycznych zawsze dają mniej więcej taką samą dużą wartość, 10^{39} . Sądził, że to nie przypadek i że jakieś głębsze prawo wiąże ze sobą te wielkości. Radykalną częścią pomysłu Diraca było użycie obecnego wieku wszechświata jako jednej ze „stałych” w niektórych rozważanych przez niego kombinacjach. Oczywiście wiek wszechświata zmienia się w czasie, więc przypisując fundamentalne znaczenie tym koincydencjom liczbowym, zmusił również jedną z tradycyjnych stałych fizycznych do zmiany w miarę upływu czasu. Dirac poświęcił najstarszą „stałą”, stałą grawitacji Newtona G , która musiała być odwrotnie proporcjonalna do wieku wszechświata, aby jego obliczenia miały sens. Okazało się to niefortunnym pomysłem. We wszechświecie, w którym grawitacja słabnie z czasem, energia wytwarzana przez Słońce byłaby znacznie większa w niezbyt odległej przeszłości, powodując wrzenie oceanów na Ziemi w erze przedkambryjskiej do tego stopnia, że znane nam życie nie mogłoby wyewoluować.

⁵ Pomysł, że dodatkowe wymiary przestrzeni mogą mieć coś wspólnego z unifikacją sił, pochodzi z prac niemieckiego matematyka Theodora Kaluzy i szwedzkiego fizyka Oscara Kleina z lat dwudziestych. Kaluza odkrył, że równanie Einsteina zastosowane do wszechświatów z jednym wymiarem czasowym i czterema wymiarami przestrzennymi opisuje nie tylko grawitację w znanej czterowymiarowej czasoprzestrzeni, lecz także równania elektromagnetyzmu Maxwella. Elektromagnetyzm wyłania się w koncepcji Kaluzy ze zmarszczek rozchodzących się w dodatkowym, czwartym wymiarze przestrzeni. Następnie Klein zasugerował, że ten dodatkowy wymiar mógłby być całkowicie ukryty przed naszymi zmysłami, jeśli byłby bardzo mały. Łącząc to wszystko, model Kaluzy i Kleina stanowił wczesny przykład unifikującej siły dodatkowych wymiarów.

⁶ Leonard Susskind, *The Anthropic Landscape of String Theory*, w: *Universe or Multiverse?* red. B. Carr (Cambridge: Cambridge University Press, 2007), s. 247–266.

⁷ Co więcej, stała kosmologiczna nie może być też ujemna, ponieważ prowadziłoby to do dodatkowego przyciągającego efektu powodującego ponowne zapadnięcie się wszechświata w Wielkim Kolapsie, zanim galaktyki miałyby szansę się uformować.

⁸ Powodem jest to, że jeśli wszechświat (wyspowy) rozpoczyna się po inflacji z większymi pierwotnymi różnicami gęstości, to proces wzrostu struktur wielkoskalowych może

skuteczniej oprzeć się rozdującemu działaniu stałej kosmologicznej. Rozszerza to zakres wartości λ pozwalających na istnienie galaktyk o kilka rzędów wielkości.

⁹ Weźmy na przykład pod uwagę dwa rodzaje wszechświatów wyspowych w kosmicznym krajobrazie, które nadają się do zamieszkania, ale mają inne cząstki tworzące ciemną materię (przy takiej samej całkowitej ilości ciemnej materii). Wyobraźmy sobie, że w jednym wszechświecie dodatkowe zwinięte wymiary teorii strun wytwarzają bardzo ciężkie cząstki ciemnej materii, których nie można wytworzyć w ziemskich akceleratorach, podczas gdy w drugim wszechświecie lekkie cząstki ciemnej materii powinny być wykrywane przez następcę LHC. Czy powinniśmy się spodziewać znalezienia cząstki ciemnej materii, gdy uruchomimy kolejny zderzacz cząstek? Jest to całkowicie uzasadnione pytanie, na które fizycy cząstek (nie wspominając o rządach i opinii publicznej finansujących badania z zakresu fizyki) chcieliby znać odpowiedź. Najwyraźniej zasada antropiczna tu nie pomaga; oba rodzaje wysp są równie dobre z antropicznego punktu widzenia. Zamiast tego potrzebny byłby teoretyczny model określający względne prawdopodobieństwo obu typów wysp bez opierania się na losowym doborze antropicznym. Powróćmy do tego w następnym rozdziale, w którym będę się starał pokazać, że właśnie taki model zapewnia nam czysto kwantowe spojrzenie na kosmologię.

¹⁰ Wymowną krytykę losowego doboru w kosmologii można znaleźć w artykule Jamesa B. Hartle'a i Marka Srednickiego *Are we Typical?* „Physical Review” D 75 (2007), s. 123523.

¹¹ Niektórzy pionierzy kosmologii również zdawali sobie sprawę z tego, że początkowe prawdopodobieństwo lub pojęcia typowości były mało przydatne przy rozpatrywaniu jedyne w swoim rodzaju układu. Rozważając kwantowe pochodzenie wszechświata, Lemaître stwierdził: „Rozszczepienie atomu może nastąpić na wiele sposobów. To, co naprawdę się wydarzyło, mogło być bardzo nieprawdopodobne”. Dirac poczynił podobne uwagi w liście do Gamowa, który skrytykował jego zmienną w czasie teorię grawitacji opisującą powstawanie Układu Słonecznego na tej podstawie, że wymaga ona od Słońca mało prawdopodobnej historii. Dirac odpowiedział, że zgadza się z tym, iż ścieżka historii Słońca jest nieprawdopodobna w jego teorii, ale ten rodzaj nieprawdopodobieństwa nie ma znaczenia. „Jeżeli weźmiemy pod uwagę wszystkie gwiazdy, które mają planety, tylko niewielka ich część przejdzie przez obłoki o odpowiedniej gęstości [...] Jeśli jednak choć jedna istnieje, to wystarczy, aby dopasować fakty. Nie mam więc nic przeciwko założeniu, że nasze Słońce miało bardzo niezwykłą i nieprawdopodobną historię”.

¹² Kontakt osobisty.

ROZDZIAŁ 6

Bez pytań nie ma historii!

We had this old idea, that there was a universe out there, and here is man, the observer, safely protected from the universe by a six-inch slab of plate glass. Now we learn from the quantum world that even to observe so minuscule an object as an electron we have to shatter the plate glass; we have to reach in there...

Dawno temu myśleliśmy, że gdzieś jest wszechświat, a oto tutaj jest człowiek, obserwator, dobrze chroniony przed wszechświatem dwudziestocentymetrową taflą szkła. Dziś świat kwantowy pokazuje nam, że nawet aby zaobserwować tak maleńki obiekt jak elektron, musimy rozbić szklaną szybę; musimy tam sięgnąć...

JOHN ARCHIBALD WHEELER, *A QUESTION OF PHYSICS*

Kiedyś zapytałem Stephena, jak definiuje sławę. *To być znanym przez więcej osób, niż się samemu zna* — odpowiedział. Nie zdawałem sobie sprawy, jak dokładna była ta odpowiedź, aż do sierpnia 2002 roku, kiedy jego sława rozwiązała mały kosmiczny incydent.

Było to tuż po tym, jak ukończyłem studia w Cambridge, po kilku latach naszej współpracy. Razem z żoną podróżowałem po Azji Środkowej śladami jedwabnych szlaków. Uznałem, że skoro zamierzam poświęcić resztę życia na badanie multiświata, może lepiej będzie, jeśli najpierw dowiem się więcej o naszym wszechświecie. Ale tak się złożyło, że kiedy byliśmy w Afganistanie, w drodze do wielkiego obserwatorium w Samarkandzie w Uzbekistanie, zbudowanego przez sułtana astronoma Ulugh Bega w latach dwudziestych XV wieku, otrzymałem e-mail od Stephena, w którym nakłaniał mnie, abym wrócił i spotkał się z nim w Cambridge. Nieco zaniepokojeni ruszyliśmy od razu w drogę powrotną. Jednak próbując opuścić Afganistan, utknęliśmy na

starym radzieckim moście na Amu-darii, rzece płynącej między Uzbekistanem a Afganistanem. Samotny strażnik na środku mostu wyjaśnił, że przejście graniczne zostało zamknięte, aby uniemożliwić ludziom wjazd do Afganistanu. Powiedziałem mu, że my akurat chcemy się wydostać, a nie wjechać, ale nie robiło to dla niego żadnej różnicy. Po powrocie do konsulatu uzbeckiego, próbując wynegocjować nasz przejazd, pokazałem życzliwemu konsulowi uzbeckiemu krótką wiadomość od Stephena nakłaniającą mnie do powrotu. Okazało się, że konsul był wielbicielem Hawkinga i kilka minut później osobiście przewiózł nas przez most do Uzbekistanu, żebyśmy mogli wrócić do Cambridge¹.

Do tego czasu DAMTP wyprowadził się z centrum Cambridge i stał się częścią nowoczesnego kampusu nauk matematycznych, który został wybudowany za boiskami sportowymi Kolegium św. Jana na zachodnich obrzeżach miasta. Przestronny, dobrze oświetlony narożny gabinet Stephena z widokiem na kampus i wypełniony — często kapryśną — automatyką domową, całkowicie różnił się od zakurzonego, ciemnego pokoju przy Silver Street, gdzie spotkaliśmy się po raz pierwszy. Kiedy bez zwłoki pojawiłem się u niego, jego oczy błyszczały entuzjastycznie i miałem niejasne przeczucie, z jakiego powodu.

Klikając dwa razy szybciej niż zwykle, Stephen pominął swoją zwyczajową pogawędkę i od razu przeszedł do sedna².

Zmieniłem zdanie. „Krótka historia [czasu]” jest napisana ze złej perspektywy.

— To prawda! Czy powiedziałeś już o tym swojemu wydawcy? — przytaknąłem z uśmiechem.

Zaciekawiony Stephen podniósł wzrok.

— W *Krótkiej historii* przyjąłeś boską perspektywę na wszechświat — powiedziałem — tak jakbyśmy patrzyli na wszechświat lub jego funkcję falową spoza niego.

Stephen uniósł brwi, tym samym upewniając mnie, że nadajemy na tych

samych falach.

Tak samo jak Newton i Einstein — odpowiedział, trochę jakby w swojej obronie. I dodał: Boska perspektywa jest odpowiednia do eksperymentów laboratoryjnych, takich jak rozpraszanie cząstek, w których przygotowuje się stan początkowy i mierzy stan końcowy. Nie wiemy jednak, jaki był stan początkowy wszechświata, i na pewno nie możemy wypróbować różnych stanów początkowych, aby sprawdzić, jakie rodzaje wszechświata z nich powstaną.

Jak wiemy, laboratoria są zaprojektowane do badania zachowania układów z zewnątrz. Doświadczalnicy pieczołowicie utrzymują wyraźny dystans między swoimi eksperymentami a światem zewnętrzym. (A fizycy cząstek w CERN powinni naprawdę trzymać się w bezpiecznej odległości od swoich wysokoenergetycznych zderzeń!) Tradycyjna teoria fizyczna odzwierciedla ten podział, wprowadzając wyraźne pojęciowe zróżnicowanie między dynamiką rządzoną prawami przyrody a warunkami brzegowymi reprezentującymi układ doświadczalny i stan początkowy układu. Te pierwsze pragniemy odkryć i poddać badaniom, podczas gdy drugie staramy się kontrolować. Jest to dualizm, który opisałem w rozdziale 3.

Ten wyraźny rozdźwięk między prawami a warunkami brzegowymi sprawia, że nauka laboratoryjna jest ściśle predyktywna, ale jednocześnie ogranicza jej zakres, gdyż z trudem udaje się nam wcisnąć cały wszechświat w laboratoryjny kaftan bezpieczeństwa. Uprzedzając Stephena, odpowiedziałem stanowczo:

— Boska perspektywa w kosmologii jest oczywiście błędna. Znajdujemy się we wszechświecie, a nie poza nim.

Stephen przyznał mi rację i mocno skoncentrował się na sformułowaniu następnego zdania.

Niezauważenie tego — wyklikał — zaprowadziło nas w ślepią uliczkę. Potrzebujemy nowej filozofii [fizyki] dla kosmologii.

— Ach — zaśmiałem się — nareszcie przyszedł czas na filozofię!

Odkładając na chwilę na bok swoje podejrzenia co do filozofii, skinął głową, unosząc brwi. Udało nam się w końcu zrozumieć, że spór Lindego z Hawkingiem nie był jedynie dyskusją między dwoma teoriami kosmologicznymi. Sedno kontrowersji wokół multiświata stanowiły kluczowe pytania dotyczące głębszej epistemologicznej natury teorii fizycznej. Jaki mamy związek z naszymi teoriami fizycznymi? Co o wielkich pytaniach egzystencjalnych ostatecznie mówią nam wspaniałe odkrycia fizyki i kosmologii?

Od zarania nowożytnej rewolucji naukowej fizyka rozwijała się dzięki przyjęciu boskiej wizji kosmosu, ale nie w kategoriach stwórcy — a przynajmniej nie zawsze — lecz perspektywy.

Kiedy Kopernik podał w wątpliwość geocentryczny światopogląd starożytnych, wyobrażał sobie, że spogląda z góry na Ziemię i Układ Słoneczny z punktu obserwacyjnego znajdującego się w gwiazdach. Jego założenie, że planety poruszają się po orbitach kołowych, powodowało, że heliocentryczny model nie był dokładny, podobnie jak obserwacje astronomiczne w tamtym czasie³. Jednak wyobrażając sobie Ziemię i planety tak, jakby unosił się wysoko nad nimi, Kopernik wprowadził rewolucyjny nowy sposób myślenia o kosmosie i naszym w nim miejscu. Odkrył coś, co można nazwać punktem archimedesowym w fizyce i astronomii — koncepcję, że istnieje odległa perspektywa, z której potrafimy uzyskać obiektywne zrozumienie⁴. I podczas gdy musiały minąć stulecia, zanim zainspirowana przez tę ideę nowa nauka rozwinęła się i zmieniła świat, rewolucja kopernikańska potrzebowała zaledwie kilku dekad, aby wprowadzić ludzkość w zupełnie nową rzeczywistość pojęciową, w której ich macierzysta planeta nie była już centralnym punktem kosmosu⁵.

Dziś wiemy, że pisma Kopernika były zaledwie początkiem nieustannego dążenia do punktu archimedesowego. Na przestrzeni wieków perspektywa kopernikańska zakorzeniała się coraz głębiej w języku fizyki. Czymkolwiek

zajmujemy się dziś w fizyce — czy przyspieszamy cząstki, czy próbujemy stworzyć nowe pierwiastki, czy też wychytujemy słabe fotony CMB — zawsze rozumiemy tak, jakbyśmy obserwowali naturę z abstrakcyjnego punktu poza nią, inaczej nazywanego „widokiem znikąd”⁶. Fizycy, nie będąc tak naprawdę „nigdzie”, wciąż przywiązani do Ziemi i jej ziemskich warunków, opracowali coraz bardziej pomysłowe sposoby działania i myślenia o wszechświecie tak, jakbyśmy mogli go pojmować obiektywnie.

Żadne inne odkrycie nie pozwoliło w tym dążeniu wykonać większego kroku naprzód niż zasady dynamiki i prawo powszechnego ciężenia Newtona. Newton rozumiał, że związek między matematyką a światem fizycznym, który zadziwiał naukowców od czasów Platona, obejmuje ruch i ewolucję, a nie ponadczasowe kształty i formy. Sukces i uniwersalność jego praw wzmocniły ideę, że nauka odkrywa obiektywną wiedzę o świecie. Newton próbował zastosować „widok znikąd” w swej pracy, odnosząc wszystkie ruchy do wymagowanej, ustalonej sceny przestrzennej wyznaczonej przez odległe gwiazdy — absolutnej przestrzeni, którą uznał za niezmienną i nieruchomą. Jego prawo powszechnego ciężenia i trzy zasady dynamiki opisywały, jak obiekty poruszają się na tej scenie, ale nic nie miało wpływu na przestrzeń absolutną. Absolutna przestrzeń i absolutny czas stanowiły solidne rusztowanie w fizyce Newtona, podarowaną przez Boga niezmienną i wieczną arenę, na której toczą się wszystkie wydarzenia.

Jednak Newtonowskie tło absolutów nie było, wbrew jego nadziejom, całkowicie obiektywnym punktem odniesienia. Prosta matematyczna forma jego praw dotyczy jedynie wyróżnionych aktorów na tej kosmicznej scenie, którzy nie obracają się ani nie przyspieszają względem przestrzeni absolutnej. Załóżmy, że jesteśmy „niewyróżnionym astronautą”, na przykład w obracającym się statku kosmicznym. Gdybyśmy wyjrzeli przez iluminator, zobaczylibyśmy odległe gwiazdy obracające się w kierunku przeciwnym do obrotu naszego statku kosmicznego, mimo że nie działają na nie żadne siły. Jest to pogwałcenie pierwszej zasady dynamiki Newtona mówiącej, że ciała,

na które nie działają żadne siły, pozostają w spoczynku lub poruszają się ze stałą prędkością po linii prostej. Tak więc eleganckie prawa Newtona są poprawne tylko dla wyróżnionych obserwatorów związanych z przestrzenią absolutną, dla których prawa ruchu wydają się prostsze niż dla wszystkich innych.

To stanowiło wystarczający powód, aby Einstein był niezadowolony z praw Newtona. Nie potrafił zaakceptować, że możemy mieć opis natury wyróżniający pewnych obserwatorów, dla których tylko dzięki ich ruchowi świat wydawał się prostszy. Dla Einsteina był to relikw przedkopernikowskiego światopoglądu, który należało obalić. I tak właśnie postąpił. Zastępując absolutną przestrzeń i czas Newtona nową koncepcją czasoprzestrzeni, która jest relacyjna i dynamiczna, jego geniusz pozwolił znaleźć taki sposób sformułowania praw fizycznych, aby wszystkich obserwatorów obowiązywały te same równania. Równanie ogólnej teorii względności (zob. strona [81](#)) wygląda tak samo niezależnie od tego, gdzie jesteśmy i w jaki sposób się poruszamy. Aby wyjaśnić, jak obserwacje konkretnego obserwatora zależą od jego położenia i ruchu, teoria została wyposażona w zestaw reguł transformacyjnych, które wiążą ze sobą perspektywy różnych obserwatorów. Dzięki tym zasadom każdy może wydobyć „obiektywne jądro” natury — przynajmniej jeśli chodzi o grawitację klasyczną — z tego uniwersalnego równania.

Teoria względności zrealizowała marzenie Einsteina o tym, że nikt nie powinien mieć wyróżnionej perspektywy. Dla Einsteina prawdziwie obiektywne korzenie rzeczywistości tkwiły nie w szczególnej perspektywie wyróżnionych obserwatorów, ale w abstrakcyjnej architekturze matematycznej leżącej u podstaw natury. Einstein w pewnym sensie wyniósł perspektywę kopernikańską w fizyce na wyższy poziom. Przeniósł poszukiwania fizyki dotyczące punktu archimedesowego całkowicie poza przestrzeń i czas, w transcendentną sferę relacji matematycznych. Ta wizja umocniła w kręgach naukowych ideę, że istnieją fundamentalne prawa, których realność wykracza

poza fizyczny wszechświat, będące źródłem prawdziwych wyjaśnień przyczynowych. Jak ujął to w 1992 roku laureat Nagrody Nobla Sheldon Glashow, jeden z najsłynniejszych rzeczników tego stanowiska: „Wierzymy, że świat jest poznawalny. Twierdzimy, że istnieją wieczne, obiektywne, pozahistoryczne, społecznie neutralne, zewnętrzne i uniwersalne prawdy”⁷.

Na przekór przeciwnościom kosmologia multiświata utrzymuje pogląd, że fizyka ostatecznie opiera się na mocnych i ponadczasowych fundamentach. Teoria multiświata w pewnym sensie przesuwając punkt archimedesowy jeszcze dalej — znacznie dalej, niż miał odwagę uczynić to Archimedes, Kopernik czy nawet Einstein. Postulując istnienie multiświatowych metapraw posiadających jakiś rodzaj wcześniejszej egzystencji, kosmologia multiświata raz jeszcze potwierdza wiodący do Newtona paradygmat przestrzeni konfiguracyjnej zjawisk fizycznych, osadzonych w ustalonej strukturze tła, którą możemy uchwycić i zrozumieć z boskiej perspektywy.

Podczas gdy ontologiczny status praw fizycznych nie ma większego znaczenia w kontrolowanym środowisku laboratoryjnym, staje się istotny, gdy zastanawiamy się nad ich głębszym pochodzeniem — nie mówiąc już o ich biofilnym charakterze. W poprzednim rozdziale opisałem, w jaki sposób rozważanie tych głębszych tajemnic wplątało teorię multiświata w samodestrukcyjną spiralę. To skłoniło nas do postawienia pytania, czy cały ten gmach stoi na twardym gruncie. Czy wahadło kopernikańskie w kosmologii przechyliło się zbyt daleko w kierunku absolutnej obiektywności?

Prawdę powiedziawszy, dylematy odkryć Kopernika i Galileusza nie uszły uwagi wczesnych filozofów nowożytnych. W jaki sposób my, ludzie, skazani na życie w ziemskich warunkach potrafimy jednocześnie obiektywnie patrzeć na nasz świat? Natychmiastową reakcją filozoficzną na nadejście nowożytnej ery naukowej nie była zwycięska radość, lecz głębokie zwątpienie, począwszy od *De omnibus dubitandum* Kartezjusza, prezentującego jego daleko idące zwątpienie, czy coś takiego jak prawda lub rzeczywistość w ogóle istnieje.

Doniosłe spostrzeżenie *Ignoramus* („Nie wiemy”), które wywołało rewolucję naukową, zadało również cios ludzkiemu zaufaniu do świata. Hannah Arendt, jedna z najsłynniejszych myślicielek XX wieku, wyraźnie wyartykułowała to niewygodne stanowisko w *The Human Condition* [Kondycji ludzkiej]: „Wielkie postępy Galileusza dowiodły, że zarówno najgorszy strach ludzkich spekulacji — że nasze zmysły mogą nas zdradzić — jak i ich najbardziej ambitna nadzieja — archimedesowe pragnienie znalezienia punktu zewnętrznego, z którego można mieć dostęp do uniwersalnej wiedzy — mogą spełnić się tylko razem”⁸.

Kartezjańską odpowiedzią na rewolucję naukową było przeniesienie punktu archimedesowego do wewnątrz, do człowieka, i wybór ludzkiego umysłu jako ostatecznego punktu odniesienia. Początek ery nowożytnej zmusił ludzkość do zaufania we własne siły. Z *Dubito ergo sum* („Wątpię, więc jestem”) powstało *Cogito ergo sum* („Myślę, więc jestem”). W ten sposób rewolucja naukowa doprowadziła do paradoksalnej sytuacji, w której ludzkość zwróciła się do wewnątrz, podczas gdy jej teleskopy — wraz z podążającymi w ślad za tym eksperymentami i abstrakcją — wyniosły ją na zewnątrz, miliony, a ostatecznie miliardy lat świetlnych w otchłanie wszechświata. Pięć wieków później połączenie tych dwóch przeciwnych ruchów wprowadziło ludzkość w oszołomienie i zakłopotanie. Z jednej strony współczesna nauka i kosmologia odsłoniły najwspanialszą sieć powiązań między naturą kosmosu a naszym w nim istnieniem. Począwszy od syntezy węgla w kolejnych pokoleniach gwiazd po kwantowe zarodki galaktyk w pierwotnym wszechświecie, nasze współczesne rozumienie kosmosu ujawniło cudowną syntezę. Jednak na bardziej podstawowym poziomie, do którego Stephen starał się dotrzeć, odkrycia te spowodowały, że pojmowanie przez człowieka jego miejsca w wielkim kosmicznym planie stało się bardzo niepewne. Współczesna nauka wytworzyła przepaść między naszym rozumieniem funkcjonowania natury a naszymi ludzkimi celami, która naruszyła nasze poczucie przynależności do tego świata. Steven Weinberg, żarliwy

redukcjonista i niezwykle utalentowany myśliciel archimedesowy, wyraził tę obawę pod koniec swej książki *Pierwsze trzy minuty*, w której pisze: „Im bardziej wszechświat wydaje się zrozumiały, tym bardziej sprawia wrażenie bezcelowego”.

Nie mogę się oprzeć wrażeniu, że u samych korzeni wyrażanego przez Weinberga uczucia leży platońska koncepcja tych praw. W naukowej ontologii, w której jesteśmy oderwani od najbardziej fundamentalnych teorii fizyki i całej kosmologii, nie dziwi nas, że wszechświat, który nauka pozwala nam odkryć, wydaje się bezcelowy, a jego biofilny charakter pozostaje całkowicie tajemniczy i dezorientujący.

Co więc się stanie, jeśli zrezygnujemy z boskiego spojrzenia na świat? Co, jeśli zrezygnujemy z widoku znikąd i zamiast tego umieścimy siebie samych i wszystko inne w układzie, który próbujemy zrozumieć? W prawdziwie holistycznej kosmologii nie powinno być „reszty wszechświata” oddzielonej w celu określenia warunków brzegowych lub podtrzymania metafizycznego tła absolutów. Jeśli już, kosmologia to odwrotność nauki laboratoryjnej — znajdujemy się w układzie i spoglądamy na zewnątrz.

Czas przestać bawić się w Boga — oznajmił szeroko uśmiechnięty Stephen, kiedy wróciliśmy z lunchu.

Stołówka w nowym kampusie matematycznym bardzo różniła się od starej, tętniącej życiem świetlicy DAMTP, która stanowiła niewyczerpane źródło doskonałej nauki i świetnych znajomości. Główny problem z nową stołówką polegał nie tyle na kiepskim jedzeniu, ile na tym, że nie wolno nam było pisać wzorów na stołach.

Po raz pierwszy Stephen wydawał się zgadzać z filozofami. *Nasze teorie fizyczne nie przebywają w platońskim niebie za darmo* — napisał. *Nie jesteśmy aniołami, które patrzą na wszechświat z zewnątrz. My i nasze teorie jesteśmy częścią opisywanego przez nas wszechświata.*

I kontynuował: *Nasze teorie nigdy nie są od nas całkowicie oddzielone*⁹.

To oczywista i pozornie tautologiczna kwestia: teoretyzowanie kosmologiczne powinno wyjaśniać nasze istnienie we wszechświecie. Oczywisty fakt, że żyjemy na planecie w galaktyce Drogi Mlecznej, otoczeni gwiazdami i innymi galaktykami, i jesteśmy zanurzeni w słabej poświacie mikrofalowego promieniowania tła, oznacza, że z konieczności musimy patrzeć na kosmos „od środka”. Stephen nazwał to perspektywą mrówki. Czy to możliwe, że — niezależnie od tego, jak paradoksalnie to brzmi — musimy się nauczyć żyć z tym subtelnym elementem podmiotowości nieodłącznym w perspektywie mrówki, aby osiągnąć wyższy poziom zrozumienia w kosmologii?

Kiedy rozważaliśmy te kwestie, gabinet Stephena zamienił się w ul. Cały czas ktoś wchodził i wychodził — koledzy, personel medyczny, a nawet znane osobistości — ale Stephen wydawał się nie zwracać uwagi na otaczające go szaleństwo. Nie po raz pierwszy zauważyłem wtedy, że tak naprawdę potrzebował sporego poziomu chaosu wokół siebie, aby skupić swój umysł. W trakcie naszej tradycyjnej popołudniowej przerwy, podczas której poczęstował mnie filiżanką herbaty, jednocześnie zjadając okazałą porcję bananów i kiwi, ponownie skupił się na klasycznych podstawach kosmologii multiświata jako głównych winowajcach uporczywej boskiej perspektywy w kosmologii.

Zwolennicy multiświata trzymają się kurczowo spojrzenia z perspektywy Boga, ponieważ zakładają, że kosmos jako całość ma jedną historię, w formie określonej czasoprzestrzeni z dobrze zdefiniowanym punktem początkowym i niepowtarzalną ewolucją. To jest w zasadzie klasyczny obraz — wyklikał Stephen.

Tak naprawdę kosmologia multiświata jest hybrydą myślenia klasycznego i kwantowego. Z jednej strony można sobie wyobrazić, że przypadkowe przeskoki kwantowe wytwarzają wiele różnych wszechświatów wyspowych. Z drugiej strony zakładamy, że dzieje się to w gigantycznej, wcześniej istniejącej, poddanej inflacji przestrzeni. Ta ostatnia służy jako klasyczne tło

w teorii multiświata — rusztowanie nieco podobne do areny Newtona, z tym wyjątkiem, że będzie ono stale pęcznić. To tło pozwala — a wręcz kusi — aby wyobrazić sobie mozaikę wysp jak gdyby z zewnątrz, tak jakby tworzenie wszechświatów wyspowych nie różniło się zasadniczo od zwykłego eksperymentu laboratoryjnego.

Stephen klikał dalej, aby dokończyć swoją myśl: *Multiświat prowadzi do oddolnej filozofii kosmologicznej, w której wyobrażamy sobie ewolucję kosmosu do przodu w czasie, aby przewidzieć, co powinniśmy zobaczyć.*

W ten sposób — jako schemat wyjaśniający — teoria multiświata wpisuje się w programy ontologiczne Newtona i Einsteina oraz ich fundamentalnie przyczynowe i deterministyczne rozumowanie o wszechświecie. Powiązaniem przejawem tego myślenia jest to, że mieszkańcy określonego wszechświata wyspowego w multiświecie mają wyjątkową i określoną przeszłość.

— Ale ty i Jim rozumieliście waszą teorię braku brzegów w ten sam oddolny sposób — przypomniałem — mimo że ma ona być kwantowa. Ten błędny przyczynowy pogląd jest wizją, którą przedstawiłeś w *Krótkiej historii czasu*.

Wydawało się, że dzięki mojej uwadze trafiliśmy w kluczowy punkt. Stephen uniósł brwi i szybko wznowił klikanie.

Czekając, aż ułoży zdanie, przeglądałem pracę doktorską Stephena z 1965 roku. Pod jej koniec natknąłem się na akapit, w którym rozwinął dopiero co udowodnione przez siebie twierdzenie o osobliwościach Wielkiego Wybuchu, gdzie stwierdził, że wynika z niego, iż początek wszechświata był zdarzeniem kwantowym. Stephen rozwinął później hipotezę braku brzegów opisującą to kwantowe pochodzenie (zob. rozdział 3). Jednak zinterpretował swoją teorię braku brzegów przez pryzmat przyczynowy, charakterystyczny dla klasycznej kosmologii.

Z oddolnego punktu widzenia hipoteza braku brzegów opisuje powstanie wszechświata z niczego. Teoria ta jest uważana za kolejny gmach platoński, jakby zamieszkiwała abstrakcyjną „nicość” poprzedzającą przestrzeń i czas.

Kiedy Jim i Stephen po raz pierwszy przedstawili swoją hipotezę początku pozbawionego brzegów, chcieli podać prawdziwie przyczynowe wyjaśnienie pochodzenia wszechświata, nie tylko jak powstał, ale także dlaczego — a nie tylko w jaki sposób — istnieje. Nie wyszło to zbyt dobrze. Postrzegana jako schemat oddolny teoria braku brzegów przewiduje powstanie pustego wszechświata, pozbawionego galaktyk i obserwatorów. Co zrozumiałe, spowodowało to, że teoria stała się mocno kontrowersyjna, jak opisałem w rozdziale 4.

Stephen przestał klikać, więc pochyliłem się, żeby przeczytać. *Sprzeciwiam się teraz idei, że wszechświat ma globalny stan klasyczny. Żyjemy we wszechświecie kwantowym, więc powinien być on opisany superpozycją historii à la Feynman, z których każda opisywana jest własnym prawdopodobieństwem.*

Stephen właśnie rozpoczynał swoją mantrę o kosmologii kwantowej. Aby ocenić, czy nadal nadajemy na tych samych falach, przeformułowałem jego myśl:

— Uważasz, że powinniśmy próbować przyjąć pełną perspektywę kwantową nie tylko na to, co dzieje się we wszechświecie (funkcje falowe cząstek i strun i tak dalej), ale na kosmos jako całość. Więc powinniśmy zarzucić koncepcję, że wszechświat jest pojedynczą, rozszerzającą się przestrzenią, i zamiast tego myśleć o nim jako o superpozycji wielu możliwych czasoprzestrzeni. Ale to oznacza, że wszechświat byłby w pewnym sensie *nieoznaczony*, nawet w największych skalach, sięgających daleko poza nasz kosmologiczny horyzont, takich jak te związane z wieczną inflacją. I że wielkoskalowe kosmiczne rozmycie podkłada bombę pod wieczne tło, którego istnienie zakłada Linde i wielbiciele multiświata.

Ku mojej uldze ponownie uniósł brwi i wznowił klikanie, choć tym razem wolniej, jakby się wahał. Ale w końcu pojawiło się następujące zdanie: *Wszechświat, jaki obserwujemy, jest jedynym rozsądnym punktem wyjścia w kosmologii.*

Poziom wyrokowania zdecydowanie piął się teraz w górę. Stephen przechodził do kluczowego etapu, który filozofowie często nazywają **faktycznością** wszechświata — faktu, że istnieje i jest tym, czym jest, a nie czymś innym. Brzmiało rozsądnie, ale dokąd miało nas to zaprowadzić? Czy był gotów przemyśleć wszystko na nowo? Miałem bardzo wiele pytań, ale od dawna wiedziałem, że za każdym razem, gdy Stephen mówił, że coś jest „rozsądne”, miał na myśli ten czy inny pomysł, którego nie był w stanie do końca udowodnić, jednak czuł, że musi być słuszny z powodów intuicyjnych, a zatem nie podlegał dyskusji. Spróbowałem więc poprowadzić naszą rozmowę dalej, zastanawiając się na głos, czy bardziej ekspansywny i płynny pogląd kosmologii kwantowej na historię — od jednej historii do wielu możliwych — może w jakiś sposób odciągnąć całe ramy teorii kosmologicznej od punktu archimedesowego. Czy czysto kwantowa teoria kosmologii mogłaby ująć naszą perspektywę mrówki w swoje teoretyczne ramy, a jednocześnie — w przeciwieństwie do zasady antropicznej — utrzymać w ryzach podstawowe zasady naukowe? Pięćset lat po Koperniku byłaby to niezwykła unifikacja.

Znów powoli, pośród zamieszania wywołanego naszym mierzaniem się z tą zmianą Kuhnowskiego paradygmatu i zbierając całą swoją energię, Stephen ułożył jeszcze jedną linijkę tekstu: *Moim zdaniem spojrzenie kwantowe [na wszechświat] prowadzi do innej filozofii kosmologii, w której działamy odgórnie, wstecz w czasie, wychodząc od powierzchni naszych obserwacji*¹⁰.

Byłem zaskoczony — nowa odgórna filozofia Stephena wydawała się burzyć relację między przyczyną a skutkiem w teorii kosmologicznej. Lecz gdy wspomniałem o tym Stephenowi, tylko się uśmiechnął. Wyraźnie ciesząc się słodkim smakiem odkrycia, nie mógł się już powstrzymać. Kiedy się rozstawaliśmy, podsumował naszą nową perspektywę z charakterystyczną zwięzłością i ambicją: *Historia wszechświata zależy od pytania, które zadajesz. Dobranoc.*

Co Stephen miał na myśli? Oczywiście kluczowa rola „aktu obserwacji” w mechanice kwantowej — zadane pytanie, jak to ujął Stephen — była znana od czasu powstania tej teorii w latach dwudziestych XX wieku. Jedną z najbardziej zaskakujących cech mechaniki kwantowej jest to, że obserwacje i pomiary eksperymentatora wchodzą bezpośrednio do procesu przewidywania.

Ta właśnie cecha mechaniki kwantowej najbardziej niepokoiła Einsteina. Kiedy przedstawiciele nowego pokolenia fizyków kwantowych spotkali się w Brukseli w październiku 1927 roku na Piątym Kongresie Solvaya, świętowali triumfującą nową teorię mikroświata. Niemiecki fizyk Max Born powiedział podobno, że fizyka osiągnie swój kres za sześć miesięcy, i nie było to zbyt dalekie od wyobrażeń Ernesta Solvaya. Ten przemysłowiec sfinansował kongresy w 1911 roku na okres trzydziestu lat, ponieważ uważał, że do tego czasu fizyka zaoferuje światu wszystko, co ma do zaoferowania¹¹.

Jednak dla jednego z największych rewolucjonistów naukowych XX wieku nowa mechanika kwantowa okazała się zbyt trudna do przełknięcia. Kiedy rozpoczął się Piąty Kongres Solvaya, Einstein był już głęboko zaniepokojony teorią kwantową. Odrzucił zaproszenie Lorentza do wygłoszenia referatu i podobno bardzo niewiele mówił podczas całego zjazdu. Jednak formalne spotkania nie były jedynym forum dyskusji. Naukowcy mieszkali w jednym hotelu i tam, w jadalni, Einstein był znacznie bardziej ożywiony. Laureat Nagrody Nobla Otto Stern pozostawił nam relację z pierwszej ręki: „Einstein schodził na śniadanie i wyrażał swoje obawy dotyczące nowej teorii kwantowej. Za każdym razem wymyślał jakiś cudowny eksperyment, z którego wynikało, że ta teoria zawiera w swym jądrze logiczną niespójność [...] Bohr zastanawiał się nad tym głęboko i wieczorem przy kolacji szczegółowo wyjaśniał tę kwestię”¹².

Einstein przeciwstawiał się kwantowej koncepcji, że cząstka może się znajdować w określonym miejscu, gdy jest obserwowana, a mimo to istnieje prawdopodobieństwo, że jest gdzieś indziej, choć jej tam nie było. „Fizyka

jest próbą uchwycenia rzeczywistości takiej, jaka jest, niezależnie od aktu obserwacji”¹³ — wyrażał swój sprzeciw i w żartach zastanawiał się, czy wymaga to **ludzkiego** obserwatora, czy wystarczy spojrzenie myszy, aby cząstki znalazły się w określonym miejscu.

Dla Einsteina probabilistyczna natura mechaniki kwantowej sygnalizowała, że teoria ta jest niekompletna, że musi istnieć głębszy model, który pozwala na obiektywnie prawdziwy opis rzeczywistości fizycznej, niezależny od jakichkolwiek aktów obserwacji. „Ta teoria [kwantowa] wiele wyjaśnia, ale nie przybliży nas ani trochę do tajemnicy Stwórcy” — napisał do Borna. „Ja w każdym razie jestem przekonany, że On nie gra w kości”¹⁴.

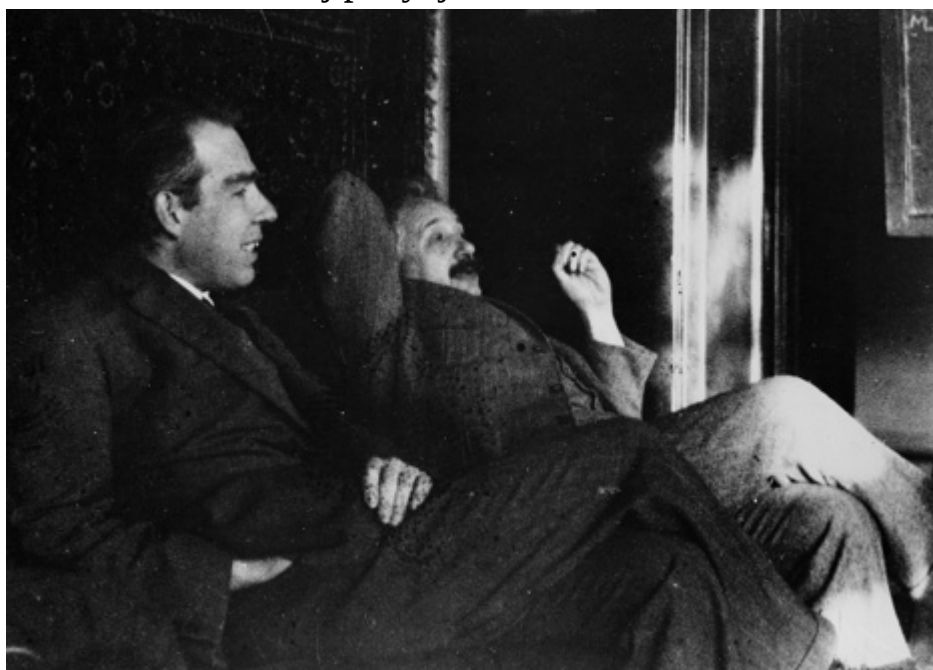
Z kolei Niels Bohr, biegły zarówno w filozofii, jak i matematyce, miał głębokie przeczucie, że mechanika kwantowa jest spójna. Bohr poważnie traktował kluczową zasadę mechaniki kwantowej, że obserwacja — czyli pytania zadawane przez nas naturze — wpływa na to, jaką postać przybiera sama natura. Stwierdził: „Żadne zjawisko nie jest realnym zjawiskiem, dopóki nie zostanie zaobserwowane”.

Na Piątym Kongresie Solvaya wystrzelono salwę otwierającą jedną z wielkich debat naukowych XX wieku: Einstein kontra Bohr. Co było stawką? Głębia i wielkość rewolucji kwantowej.

Na jednym poziomie ich debata dotyczyła podstawowego statusu przyczynowości i determinizmu w fizyce. Dzięki przypadkowym przeskokom i probabilistycznym przewidywaniom mechanika kwantowa w oczywisty sposób usuwa bezpośredni związek — doskonale znany z fizyki klasycznej — między tym, gdzie jesteśmy teraz, a tym, dokąd zmierzamy. Czy ten brak przyczynowości i determinizmu w naszym opisie przyrody jest środkiem doraźnym (podejście Einsteina), czy fundamentalną przebudową teorii fizycznej (stanowisko Bohra)?

Ale ich debata przenosi nas także do głębszej ontologii mechaniki kwantowej. W odpowiedzi na zastrzeżenia Einsteina Bohr został zmuszony do wyjaśnienia, co dokładnie powoduje, że funkcje falowe w mechanice

kwantowej przechodzą od rozmytej, widmowej superpozycji różnych rzeczywistości do ściśle określonej rzeczywistości codziennego doświadczenia. Nie obserwujemy superpozycji różnych rzeczywistości: eksperymetatorzy znajdują cząstki tu albo tam, a nie tu i tam. Jak to się dokładnie dzieje? Śmiała odpowiedź szkoły kopenhaskiej Bohra brzmiała, że to przejście jest spowodowane interwencją eksperymentatora. Bohr uważał, że akt pomiaru skłania naturę do podjęcia decyzji i ujawnienia tej lub innej rzeczywistości. Kiedy decydujemy się zmierzyć położenie cząstki, musimy wyrzucić na nią wpływ, na przykład kierując na nią wiązkę lasera. Ten wpływ, zdaniem Bohra, powoduje, że rozproszona funkcja falowa cząstki ulega kolapsowi i gwałtownie rośnie w jednym miejscu — obserwowanym położeniu. Wyłączmy laser, a funkcja falowa ponownie się rozprzestrzeni, ewoluując gładko zgodnie z równaniem Schrödingera, jak opisałem to w rozdziale 3. Włączmy go i dokonajmy pomiaru, a fala cząstki natychmiast skupi się do stanu o określonej pozycji.



II. 40. Niels Bohr i Albert Einstein pod koniec lat dwudziestych XX wieku.

Kłopot z modelem Bohra polegał na tym, że takie nagłe kolapsy są

całkowicie sprzeczne z równaniem Schrödingera. Funkcje falowe, które ewoluują zgodnie z równaniem Schrödingera, nie ulegają nagłemu kolapsowi, lecz poruszają się gładko i płynnie przez cały czas. Dlatego Bohr w swojej interpretacji aktu obserwacji przypisał szczególną rolę obserwatorom i ich pomiarom, co było radykalnie sprzeczne z matematycznymi ramami teorii.

Oznaczało to również, że schemat kopenhaski sprowadza się do czegoś, co często nazywane jest **i n s t r u m e n t a l i s t y c z n ą** interpretacją teorii kwantowej, która zakłada rozbieżność między tym, co jesteśmy w stanie zmierzyć naszymi instrumentami, a fizyczną rzeczywistością opisaną równaniami. „Nasze pomiary są tak samo podobne do tego, czym naprawdę są, jak numer telefonu do abonenta” — tymi słowami Eddington swego czasu opisał model kopenhaski¹⁵. Jednak taki instrumentalizm powoduje pojawienie się głębokiej epistemologicznej zagadki, bo czego tak naprawdę dotyczy mechanika kwantowa? Interpretacja kopenhaska nie rzuca światła na tę tajemnicę. W istocie unika tego pytania, przewidując fundamentalny podział między kwantowym światem atomów i cząstek subatomowych opisywanym przez równanie Schrödingera a zewnętrzną rzeczywistością stanowiącą tło, rządzącą się klasycznymi prawami, która obejmuje eksperymentatorów i ich sprzęt, a także resztę wszechświata. Kolaps funkcji falowej w akcie pomiaru był pomysłem Bohra na połączenie tych dwóch rozłącznych światów, trochę jak działanie zasady antropicznej wybiera konkretny wszechświat wyspowy w multiświecie. Oba działania zostały zaprojektowane w celu połączenia obiektywnego formalizmu matematycznego z fizycznym światem naszych obserwacji, ale zawiodły, ponieważ pozostały obce podstawowym ramom teorii, które miały uzupełnić.

Bohr i Einstein przez wiele lat zaostżeli swoje stanowiska i nigdy nie osiągnęli porozumienia. Z perspektywy czasu cenimy wniosek Bohra, że proces obserwacji odgrywa kluczową rolę w powoływaniu do życia zjawisk fizycznych we wszechświecie kwantowym. Zarazem jednak jego opis tego procesu w kategoriach nagłego kolapsu funkcji falowej był głęboko wadliwy.

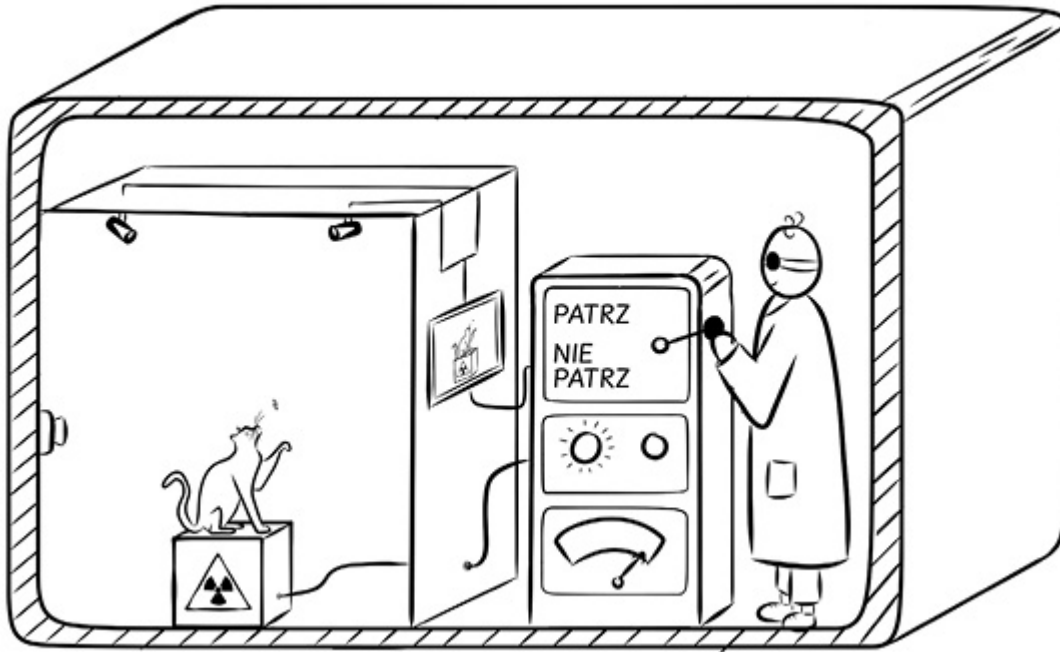
Dziś wszystkie dowody wskazują, że matematyka Schrödingera ma zastosowanie nie tylko do mikroskopijnych zbiorów kilku cząstek, ale także do znacznie większych skupisk tworzących układy makroskopowe, w tym laboratoria i obserwatorów, a nawet cały wszechświat. Einstein miał zatem rację, nie dając się przekonać metodzie Bohra. Mylił się jednak, podążając za marzeniem o alternatywnej teorii fizycznej opartej na ramach przewidywania, która znów mogłaby sprawić, że obserwowalność stałaby się nieistotna.

Postęp ostatecznie nastąpił dzięki ścisłemu połączeniu aktu obserwacji z matematycznym formalizmem teorii kwantowej. Ta synteza wyniosła ją daleko poza przewidywania Bohra i w tym kierunku teraz zmierzamy.

Ta droga rozpoczęła się błyskotliwą pracą opublikowaną w połowie lat pięćdziesiątych przez Hugh Everetta III, studenta Johna Wheelera, który zaczynał karierę naukową w teorii gier, ale po jakimś czasie zainteresował się problemem pomiaru kwantowego po wysłuchaniu wykładu Einsteina na ten temat. Everett zburzył mur wzniesiony przez Bohra oddzielający mikroświat kwantowy od klasycznego makroświata. Jego kluczowym pomysłem było poważne potraktowanie matematyki stojącej za mechaniką kwantową i zastosowanie jej globalnie. Założył — zasugerował — że nie ma żadnego kolapsu, lecz jedynie pojedyncza funkcja falowa wszechświata, która **u w z g l ę d n i a** obserwatorów i całą resztę, ewoluując gładko i płynnie i obejmując, *à la* Feynman, wszystkie możliwe ścieżki po wszystkich możliwych historiach. Oznacza to, że Everett wykonał monumentalny krok w kierunku myślenia o świecie kwantowym od wewnątrz jako o systemie zamkniętym, bez ingerencji z zewnątrz. Ilustracja 41 przywołuje ten punkt widzenia, gdzie kot Schrödingera wraz z obserwatorem i jego laboratorium są umieszczeni w jednym dużym pojemniku.

Everett postawił sobie wówczas za wielki cel wyjaśnienie, w jaki sposób na przykład w sytuacjach pomiarowych ta funkcja falowa wszechświata daje

pojedynczą konkretną odpowiedź, jednocześnie unikając kolapsu. W tym miejscu jego rozumowanie staje się fascynujące — i szokujące.



II. 41. Everett wyobrażał sobie wszechświat jako zamknięty układ kwantowy, wielki pojemnik zawierający nie tylko cząstki, ale także obserwatorów, ich aparaturę i w zasadzie wszystko inne. Możliwe historie dla przedstawionego tutaj modelu wszechświata obejmują to, czy obserwator mierzył, przez którą szczelinę przechodził elektron, czy i kiedy obserwator zdecyduje się popatrzeć na kota, czy promieniotwórcze jądro ulegnie rozpadowi, gdy popatrzy, w jaki sposób sytuacja w pojemniku jest rejestrowana i interpretowana w mózgu obserwatora, i tak dalej. Everett poszukiwał sformułowania mechaniki kwantowej, które przewidywało prawdopodobieństwa dla różnych historii opisujących to, co dzieje się w pojemniku, lecz bez żadnej obserwacji lub innej ingerencji we wnętrze pojemnika z zewnątrz.

Everett głęboko przemyślał, co dokładnie składa się na kwantowy akt obserwacji. Zakładał, że kiedy eksperymenci dokonują pomiaru, ich oddziaływanie z mierzonym układem powoduje splątanie najpierw kilku cząstek, potem aparatury, a w końcu ich stanu psychicznego ze stanem kwantowym systemu. Jak mówi nam równanie Schrödingera, to splątanie nie

powoduje jednak tajemniczego kolapsu ich wspólnej funkcji falowej (jak uważał Bohr), ale rozgałęzia się na odrębne fragmenty fali, po jednym dla każdego z możliwych wyników pomiaru. Stąd — rozumując w kategoriach funkcji falowej wszechświata, która obejmuje zarówno obserwatora, jak i to, co obserwowane — Everett był w stanie utrzymać wszystkie możliwe wyniki. Oczywiście oznaczało to, że obserwatorzy również ulegną rozszczepieniu. Obserwatorzy rozdzielą się na niemal identyczne kopie samych siebie — po jednej w każdej gałęzi — różniące się jedynie wynikiem otrzymanych pomiarów.

Weźmy na przykład kota Schrödingera — w tym słynnym eksperymencie myślowym zakładamy, że zwierzę umieszczone jest w zamkniętym pudełku leżącym na ładunku wybuchowym, który eksploduje, gdy rozpadnie się umieszczone obok promieniotwórcze jądro (zob. il. 41). Prawdopodobieństwo takiego zdarzenia wynosi 50 procent w danym okresie. Interpretacja kopenhaska bazująca na wynikach laboratoryjnych traktuje pudełko z perspektywy zewnętrznej i przewiduje, że kot będzie się znajdował w superpozycji stanu martwego i żywego niczym zombie, dopóki obserwator nie otworzy pudełka i do niego nie zajrzy, zmuszając kota do podjęcia decyzji. To nie ma sensu. Kot nie może być na wpół martwy, tak samo jak nie można być na wpół w ciąży. Ale wewnętrzna perspektywa Everetta stawia nas w obliczu zupełnie innej sytuacji. Mówi, że w tego rodzaju eksperymencie, który splątuje los kota z losem promieniotwórczego jądra, historia wszechświata nieustannie się rozgałęzia. W jednej historii jądro rozpada się w określonym momencie, ładunek wybuchu, a kot ginie. W drugiej historii jądro nie rozpada się, a kot szczęśliwie żyje sobie dalej jeszcze przez jakiś czas. Cały proces rozgałęziania przebiega płynnie. Żadna wersja kota nie doświadcza niezwyklej superpozycji, choć jedna kopia kota ma się oczywiście znacznie lepiej niż druga.

Z praktycznego punktu widzenia poszczególne fragmenty funkcji falowej Everetta zachowują się zatem jak oddzielne gałęzie rzeczywistości. Każdy

fragment fali opisuje konkretną historyczną ścieżkę składającą się z urządzenia pomiarowego rejestrującego konkretny wynik, świadomości obserwatora i wszystkiego innego, co temu towarzyszy — laboratorium, Ziemi, Układu Słonecznego i wielkoskalowego wszechświata. Dla obserwatorów znajdujących się w określonej odnodze cały proces rozgałęzienia przebiega płynnie niczym rzeka rozdzielająca się na dwa strumienie. Obserwatorzy nie byłiby świadomi swoich kopii, ponieważ resztę życia spędziliby w różnych historiach, unosząc się na odrębnych grzbietach fali kwantowej wszechświata. „Tylko ogół tych stanów obserwatorów, z ich odmienną wiedzą, zawiera pełną informację” — oświadczył Everett¹⁶.

Sam Everett wyznał, że starał się połączyć stanowiska Einsteina i Bohra. Twierdził, że różnice między nimi są kwestią perspektywy, i opisał swój model jako „obiektywnie deterministyczny, z prawdopodobieństwem pojawiającym się na poziomie subiektywnym”. To interesujący wniosek. We wczesnym kopenhaskim sformułowaniu mechaniki kwantowej prawdopodobieństwo było aksjomatyczne i fundamentalne. Otwórzcie podręcznik mechaniki kwantowej z lat trzydziestych, a na jednej z pierwszych stron zobaczycie, że prawdopodobieństwo **definiuje się** jako kwadraty amplitud funkcji falowych. Inaczej jest w przypadku modelu Everetta, w którym prawdopodobieństwo pojawia się w teorii kwantowej w bardziej subtelny, „subiektywny” sposób, podobnie do prawdopodobieństwa wkraczającego do naszego myślenia w codziennym życiu. Niezależnie od tego, czy zastanawiamy się nad pogodą, loterią czy kształtem kolejnej fali grawitacyjnej przechodzącej przez Ziemię, wszyscy cały czas używamy subiektywnego prawdopodobieństwa, aby określić ilościowo naszą niepewność w sytuacjach, w których nie mamy pełnej wiedzy. To pojęcie prawdopodobieństwa zostało sformalizowane przez włoskiego matematyka Bruna de Finettiego, który w 1974 roku napisał traktat i stwierdził w nim: „Moja teza, paradoksalnie i nieco prowokacyjnie, brzmi po prostu tak: Prawdopodobieństwo [aksjomatyczne] nie istnieje [...] istnieje tylko

prawdopodobieństwo subiektywne, stopień wiary w zaistnienie zdarzenia przypisywany przez daną osobę w danej chwili i przy danym zestawie informacji”¹⁷. I z taką właśnie sytuacją mamy do czynienia w naszym świecie. Przez całe życie większość z nas nabiera zaufania do subiektywnych wersji prawdopodobieństwa, ponieważ odkrywamy, że wyniki, które uważamy za prawdopodobne, zdarzają się często, a te, które są nieprawdopodobne, występują rzadko.

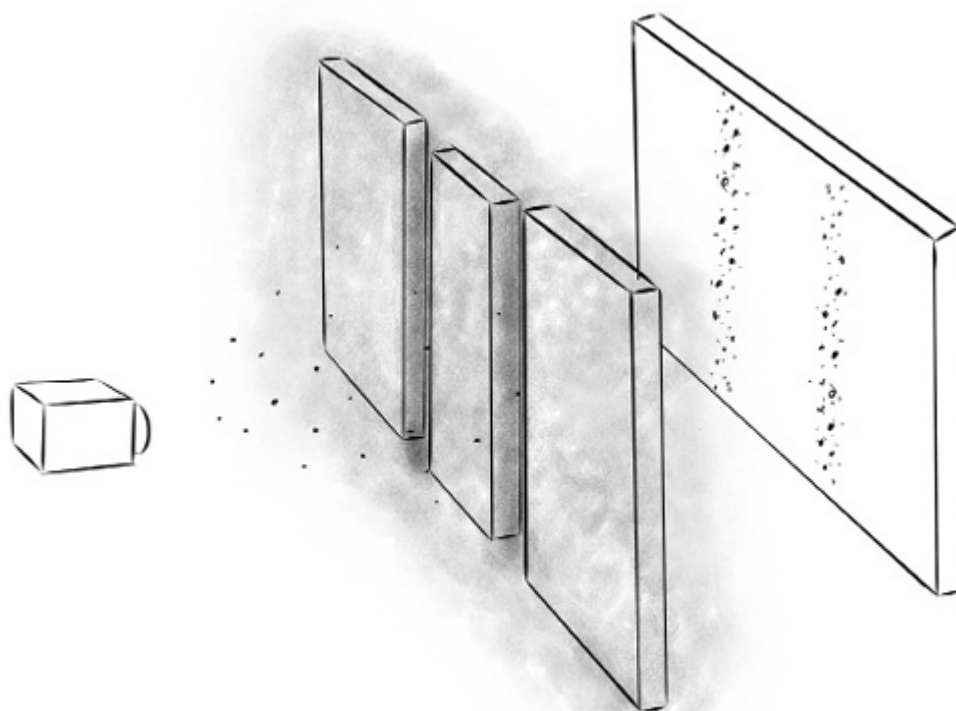
Odbiegając od wiedzy podręcznikowej, Everett rozwinął pomysł, że podobnie jak wszystkie inne prawdopodobieństwa, których używamy, prawdopodobieństwo w teorii kwantowej jest subiektywne. Pojawia się, ponieważ niewiedza eksperymentatorów w kwestii tego, jakiego konkretnego wyniku będą świadkami, jest źródłem niepełnych informacji. Prawdopodobieństwa określają ilościowo tę niepewność, a tym samym służą jako instrukcje dla eksperymentatorów, by obstawić szansę uzyskania danego wyniku, podobnie jak używamy prognozy pogody, aby ocenić, czy będziemy potrzebować parasola. Piękno i użyteczność teorii kwantowej polega na tym, że równanie Schrödingera można wykorzystać do przewidywania z wyprzedzeniem względnych amplitud fragmentów fal odpowiadających wszystkim możliwym wynikom pomiaru, a ich kwadraty okazują się optymalną strategią obstawiania wyników.

Na poziomie doświadczenia każdy akt obserwacji sprowadza się zatem do czegoś na kształt przycinania rozgałęzionego drzewa możliwej przyszłości. Sytuacja pomiarowa w teorii kwantowej przypomina rozwidlenie dróg, gdzie historia dzieli się na dwie lub więcej oddzielnych gałęzi. W doświadczeniu każdego obserwatora znajdującego się w takich rozgałęzieniach przetrwa tylko jedna odnoga. Dokładniej rzecz ujmując, na każdej gałęzi przetrwa tylko ta gałąź. Gałęzie, które nie odpowiadają wynikowi pomiaru obserwatora, ewoluują niezależnie i nie mają dalszego znaczenia wraz ze wszystkimi wyrastającymi z nich częściami drzewa. W pewnym sensie odchodzą

w ogromną niezgłębianą przestrzeń możliwości. Fizycy twierdzą, że takie nieinterferujące gałęzie historii odprzęgają się, czyli dekoherują.

Jednak nie wszystkie osobne historie ulegają dekoherencji, czego słynnym przykładem są interferujące trajektorie w eksperymencie z dwiema szczelinami, omówionym przeze mnie w rozdziale 3. W tym układzie ścieżki elektronów przechodzących przez jedną szczelinę nie odprzęgają się od podążających przez drugą szczelinę, ale splatają się ze sobą, tworząc na ekranie wzór interferencyjny (zob. il. 20). Ich przenikanie się oznacza, że nie możemy stwierdzić na podstawie obserwacji na ekranie, przez którą szczelinę przeszedł elektron. To tak, jakby poszczególne ścieżki nie miały odrębnej tożsamości. Dopiero połączenie wszystkich interferujących ścieżek docierających do danego miejsca na ekranie stanowi właściwą niezależną gałąź rzeczywistości o określonym prawdopodobieństwie i w ten sposób Feynmanowski schemat sumy po historiach wyjaśnia zaobserwowany wzór interferencyjny.

Ale wyobraźmy sobie odmianę tego eksperymentu, w której wpuszczamy gaz oddziałujących cząstek w pobliżu każdej szczeliny (zob. il. 42). Kiedy elektron przechodzi teraz przez przegrodę, fragmenty fali wychodzące z każdej szczeliny będą oddziaływać z gazem i szybko się od siebie oddzielać, tak że ich interferencja na dalszej drodze staje się praktycznie niemożliwa. Nic więc dziwnego, że wzór interferencyjny na ekranie znika i zostaje zastąpiony dwoma jasnymi paskami będącymi obrazem dwóch szczelin odpowiadających dwóm głównym ścieżkom prowadzącym do ekranu. W języku Everetta mówimy, że środowisko cząstek w pobliżu szczelin dokonało aktu obserwacji, co powoduje, że fragmenty fal ulegają dekoherencji na dwie wyraźnie odrębne historie — odnogi rzeczywistości — które od tego momentu ewoluują niezależnie. Można powiedzieć, że gaz cząstek tak naprawdę zadaje pytanie: „Którą szczeliną przeszedł elektron?” i tym samym zmusza funkcję falową elektronu do podziału na dwa rozłączne fragmenty odpowiadające dwóm możliwym odpowiedziom.



II. 42. Odmiana eksperymentu z dwiema szczelinami z cząsteczkami gazu w pobliżu szczelin, które oddziałują z elektronami. Nawet jeśli zderzenia nie wpływają w znaczący sposób na trajektorie elektronów, i tak usuwają subtelne korelacje między alternatywnymi drogami do ekranu. W wyniku tego wzór interferencyjny zostaje zniszczony i zastępuje go dwa jasne prążki, leżące z grubsza w linii z dwiema szczelinami, odpowiadając dwóm głównym drogom do ekranu. Cząsteczki gazu w praktyce dokonują aktu obserwacji w sensie kwantowym.

Te dwie odmiany eksperymentu z podwójną szczeliną ilustrują dwie kluczowe właściwości modelu Everetta. Po pierwsze, charakter zadawanych przez nas pytań wpływa na drzewiastą strukturę niezależnych odnóg, które mamy do dyspozycji. Po drugie, sensownych przewidywań w postaci rozsądnych wyników, których prawdopodobieństwa sumują się do jedności, można dokonać tylko o prawdziwie niezależnych, dekoherentnych historycznych ścieżkach, które znacznie się różnią. Wrócimy do tego punktu

w rozdziale 7, w którym omówię to, co pozostaje z multiświata po przyjęciu kwantowego podejścia do kosmologii.

W świecie makroskopowym procesy powodujące dekoherencję są wszechobecne. W każdej chwili nasze środowisko dokonuje niezliczonych aktów obserwacji, niszcząc interferencję kwantową i przekształcając nieograniczoną potencjalność w kilka wybranych aktualności. W ten sposób środowisko funkcjonuje jako naturalny pomost między rozmytym mikroświatem superpozycji a wyraźnym makroświatem codziennego doświadczenia. Co więcej, procesy dekoherencji środowiskowej w ogóle umożliwiają pojawienie się dość solidnej klasycznej rzeczywistości pomimo nieustannych fluktuacji kwantowych w skali mikroskopowej.

Weźmy wysokoenergetyczną cząstkę uwolnioną przez radioaktywny atom uranu w skorupie ziemskiej. Na początku istnieje jako funkcja falowa rozchodząca się w każdym możliwym kierunku, nie w pełni realna, dopóki nie zacznie oddziaływać na przykład z kawałkiem kwarcu. Kiedy tak się dzieje, jedna z wielu możliwych trajektorii ulega skupieniu. Oddziaływanie z kwarcem przekształca to, co mogłoby się wydarzyć, w to, co się wydarzyło, gdy atom uranu się rozpadł. W każdej gałęzi historii proces ten pojawia się jako zamrożony przypadek, w postaci wielu atomów, na które oddziałuje ta wysokoenergetyczna cząstka, których ślady są niekiedy stosowane do określania wieku minerałów. Wszechświat widziany wokół nas — ta konkretna odnoga rzeczywistości — jest zbiorczym wynikiem niezliczonych tego rodzaju aktów obserwacji dokonanych przez środowisko. Po zarejestrowaniu i zbudowaniu mnóstwa losowych wyników przez okres miliardów lat, z których każdy wnosi odrobinę informacji do naszej gałęzi historii, tak właśnie świat wokół nas nabrał swojego szczególnego charakteru. Nie powinno więc dziwić, że Stephen w naszej rozmowie doszedł do wniosku, iż kwantowe spojrzenie na wszechświat może przemycić do kosmologii pewien element cofnięcia się w czasie.

Z matematycznego punktu widzenia schemat Everetta jest niezwykle

elegancki: rządzi nim równanie Schrödingera. W każdej sytuacji. Ramy modelu Everetta pokazują, że klasyczne opakowanie Bohra to nadmiarowy bagaż, bez którego można się obejść. Proces wzajemnego oddziaływania, w którym podukłady ulegają splątaniu, powodując podział funkcji falowej wszechświata na odrębne, dekoherentne gałęzie, które stają się dla siebie niedostępne, oferuje niezwykle zadowalający mikroskopowy opis pomiarów kwantowych. Ludzka świadomość, ludzcy eksperymenci i ludzkie obserwacje ani nie są całkowicie nieistotne w schemacie Everetta, ani też nie są traktowane jako osobne zewnętrzne byty, podlegające innym regułom. Są po prostu częścią szerszego środowiska mechaniki kwantowej, nie różniąc się fundamentalnie od cząsteczek powietrza i fotonów. Everett zaproponował odmienny sposób myślenia o świecie kwantowym. Pokazał, że możemy się unosić na fali kwantowej wszechświata, a nie tylko przyglądać się jej z brzegu.

To nie tylko kwestia semantyki czy interpretacji. Podejścia Everetta i Bohra dokonują całkowicie odmiennych przewidywań dotyczących przebiegu pomiarów i obserwacji kwantowych. Podczas gdy Bohr uważał, że przetrwa tylko jeden wynik, Everett twierdził, że jest to tylko pogląd sformułowany z punktu widzenia danej gałęzi. Jego koncepcja mówi, że każdemu obserwatorowi wydaje się, *jak gdyby* inne wyniki zniknęły. W ujęciu Everetta, gdyby ktoś był w stanie w jakiś sposób odwrócić wszystkie oddziaływania składające się na daną obserwację, mógłby w zasadzie ponownie połączyć różne gałęzie i sprawić, by znów ze sobą interferowały. Oczywiście gigantyczna liczba cząstek biorących udział w dowolnym akcie obserwacji sprawiłaby, że w praktyce okazałoby się to rozpaczliwym zadaniem. Natomiast byłoby to w oczywisty sposób niemożliwe, nawet teoretycznie, gdyby funkcja falowa podczas obserwacji ulegała kolapsowi.

Różnica między podejściem Bohra a Everetta nabiera ogromnego znaczenia, gdy weźmiemy pod uwagę przeszłość. Zwróćmy uwagę, że model

kolapsu Bohra zabrania nawet myśleć o wnioskowaniu o przeszłości. Według Bohra nie ma sensu ewoluować równania Schrödingera wstecz w czasie, aby się dowiedzieć, jaka była przeszłość, ponieważ niezliczone przeszłe akty obserwacji zakłóciły gładką ewolucję określoną przez to równanie. Jednak wnioskowanie o przeszłości w celu zrozumienia, jak powstała teraźniejszość, ma kluczowe znaczenie dla kosmologii. Dlatego sformułowanie kopenhaskie jest całkowicie nieadekwatne dla kosmologii. Powstanie kosmologii kwantowej wymagało Everettiańskiego połączenia aktu obserwacji z matematycznym formalizmem teorii. Podejście Everetta odsłania głębszy zbiór zasad leżących u podstaw tej teorii — zasad, które okazują się kluczowe dla utorowania drogi do jej zastosowania do całego wszechświata.

W owym czasie jednak propozycja Everetta padła na jałowy grunt. Jego koledzy albo nie rozumieli, co miał na myśli, albo pozostali na to obojętni. Pomysł zastosowania teorii kwantowej do całego wszechświata już sam w sobie wydawał się dziwaczny. Nawet wizjoner Wheeler — nieunikający wielkich spekulacji — poczuł się w obowiązku dodać uwagę do artykułu Everetta¹⁸, gdzie wyjaśnił sformułowanie mechaniki kwantowej przez swojego studenta w bardziej stonowanym języku, który jego zdaniem miał sprawić, że będzie ono bardziej dostępne. Wszystko na próżno. Zniechęcony i sfrustrowany Everett, porównując swoich kolegów do przeciwników modelu kopernikańskiego w czasach Galileusza, wycofał się ze świata akademickiego i rozpoczął karierę naukową w wojsku.

Duża część sceptycyzmu społeczności naukowej wynikała z faktu, że jako fizyczny obraz świata sformułowanie teorii kwantowej Everetta wydaje się oszałamiające i ekstrawaganckie. Czy naprawdę potrzebujemy niewyobrażalnie dużej liczby nieobserwowalnych ścieżek i kopii nas samych tylko po to, aby wyjaśnić to, co obserwujemy? Nie pomogło też to, że program Everetta stał się znany jako wieloświatowa interpretacja mechaniki kwantowej, w ramach której wszystkie światy są często opisywane jako

jednakowo realne, podczas gdy tak naprawdę oznacza on, że układy fizyczne mają wiele różnych możliwych historii.

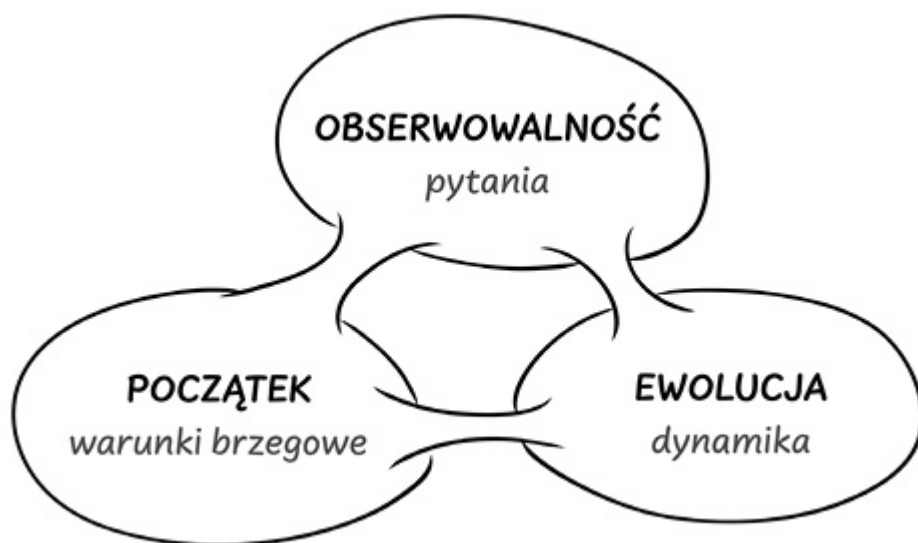
Ostatecznie jednak okazało się, że nie dało się powstrzymać tej interpretacji. Koncepcja funkcji falowej wszechświata Everetta dowiodła **t e g o** fundamentalnego spostrzeżenia, które umożliwiło rozpoczęcie traktowania całego wszechświata w kategoriach kwantowych jako układu *an sich*, niepowielanego i niezawierającego się w większym pojemniku. Praca Everetta pozwoliła mieć nadzieję, że czysto kwantowe spojrzenie na wszechświat naprawdę pozwoli obejść się bez patrzenia na niego oczami Boga i zbudować na nowo kosmologię z perspektywy mrówki. Tym samym dała początek kosmologii kwantowej, którą będą rozwijać Stephen i jego grupa z Cambridge oraz wielu innych naukowców.

Architektura kosmologii kwantowej, która wyrosła z tych wysiłków, jest naszkicowana na ilustracji 43. Przybiera formę połączonego tryptyku, który obejmuje nie tylko model kosmogenezы — na przykład hipotezę braku brzegów — i pojęcie wielu możliwych historii — na przykład krajobraz teorii strun — ale również kluczowy trzeci element: obserwowalność.

Spieszę wyjaśnić, że obserwowalność w tym schemacie nie odnosi się do rozglądania się podczas jazdy na rowerze. Obserwowalność w kosmologii kwantowej obejmuje raczej bardziej fundamentalny kwantowy akt obserwacji, który omawiałem w tym rozdziale: to proces, w którym w punktach rozgałęzienia historii jeden konkretny wynik z wielu możliwych jest przekształcany w fakt. Chociaż ten proces zawsze wiąże się z pewnym rodzajem oddziaływania, nie ogranicza się w żaden sposób do ludzkich obserwacji, a pojawiające się fakty nie muszą mieć nic wspólnego z życiem jako takim. Obserwacji można dokonać za pomocą specjalnego detektora, kota Schrödingera, kawałka kwarcu, łamania symetrii we wczesnym wszechświecie, a nawet samotnego mikrofalowego fotonu tła.

Tryptyk na ilustracji 43 podsumowuje konceptualny rdzeń nowej

kosmologii, którą rozwinęliśmy ze Stephenem. Przewiduje, że fizyczna rzeczywistość powstaje w procesie dwuetapowym. Pierwszy z nich obejmuje wszystkie możliwe historie ekspansji wszechświata, z których każda zaczyna się na przykład w początku pozbawionym brzegów. Historie rozdzielają się — każde rozwidlenie związane jest z grą losową — tworząc prawa fizyki dla każdej gałęzi i być może wyższe poziomy złożoności. Lecz ta niezgłębiona sfera niepewności i możliwości opisuje kosmos tylko w pewnym stanie przedistnienia. Na tym poziomie nie ma żadnych przewidywań, nie ma unifikującego równania, nie ma globalnego pojęcia czasu, nie ma niczego określonego — tylko spektrum możliwości. Drugim zaś jest proces wzajemnego oddziaływania nazywany przez nas obserwowalnością, który przekształca część tego, co może być, w to, co jest.



II. 43. Zwykle ramy dokonywania przewidywań w fizyce zakładają podstawowe rozróżnienie między prawami ewolucji, warunkami brzegowymi i obserwacjami lub pomiarami. W większości zagadnień naukowych to zróżnicowanie nie przeszkadza. Ale zagadka projektu w kosmologii sięga głębiej, gdyż zadaje pytania o pochodzenie tych praw i nasze miejsce w wielkim kosmicznym planie. Wymaga to bardziej ogólnego schematu predykcyjnego, który wiąże ze sobą te trzy elementy. To właśnie zapewnia kwantowe spojrzenie na kosmologię. Naszkicowany tu połączony tryptyk stanowi koncepcyjny rdzeń nowej teorii kwantowej kosmosu, w której ewolucja, warunki brzegowe

i obserwowalność są połączone w jeden całościowy wzorzec przewidywania. Jego wzajemne połączenie sygnalizuje, że wszystkie prawa w kosmologii kwantowej są mieszanką tych trzech składników.

Przypomnijmy sobie czysty pamiętnik Toma Riddle'a w książkach o Harrym Potterze. To samo dotyczy kosmosu. Dziedzina tego, co możliwe, zawiera odpowiedzi na nieskończoną różnorodność pytań, ale mówi nam coś o świecie tylko poprzez to, o co się ją pyta. We wszechświecie kwantowym — naszym wszechświecie — namacalna rzeczywistość fizyczna wyłania się z szerokiego horyzontu możliwości za pomocą ciągłego procesu zadawania pytań i dokonywania obserwacji.

Jeśli chodzi o przyszłość, obserwacja to przycinanie drzewa możliwych ścieżek rozciągających się przed nami. W tym procesie w doświadczeniu określonego obserwatora przetrwa tylko jedna gałąź. To jest właśnie przedstawiony przeze mnie odwrotny opis Everetta sytuacji pomiaru kwantowego.

Obserwowalność jednak sięga także w przeszłość. Kiedy wyrocznia Hawkingowska oznajmiła, że „historia wszechświata zależy od pytania, które zadajesz”, pomyślałem, że dokładnie to miała na myśli. Stephen uważał, że cały zbiór faktów, które określają otaczający nas wszechświat — od biosfery na Ziemi do praw fizyki obowiązujących w niskich temperaturach — stanowi wielkie pytanie, które zadajemy kosmosowi. Tryptyk przywołuje myśl, że to wielkie pytanie z mocą wsteczną powołuje do istnienia te nieliczne gałęzie historii kosmologicznej, które mają obserwowane właściwości. Oznacza to, że obserwowalność w kosmologii kwantowej nie jest jedynie refleksją lub zasadą antropicznej postselekcji działającą w już istniejącym multiświecie, lecz działaniem na głębszym poziomie, nieodzowną częścią ciągłego procesu, w którym wyłania się rzeczywistość fizyczna — i naszym zdaniem teoria fizyczna. W kwantowej teorii kosmologii wszechświat i obserwatorzy

w pewnym sensie pojawiają się razem. Głębia filozofii odgórnej, którą Stephen przewidział w 2002 roku — chociaż zajęło nam to wiele lat eksperymentów myślowych, podążania ślepych uliczkami i okazjonalnych spostrzeżeń, zanim mgła się rozwiła — polega na tym, że teoria kosmologiczna i obserwowalność są ze sobą powiązane.

Jak wspomniałem, owo splątanie nasyca kosmologię kwantową subtelnym elementem działania wstecz w czasie. Nie podążamy za wszechświatem oddolnie — do przodu w czasie — ponieważ nie zakładamy już, że wszechświat ma obiektywną, niezależną od obserwatora historię z określonym punktem wyjścia i ewolucją. Wręcz przeciwnie, w tryptyk wbudowany jest sprzeczny z intuicją pomysł, że w jakimś fundamentalnym sensie, który jeszcze nie został uściślony, historia na najgłębszym poziomie pojawia się wstecz w czasie, zaczynając od naszych obserwacji. To tak, jakby ogromna liczba aktów obserwacji z mocą wsteczną decydowała o wyniku Wielkiego Wybuchu, począwszy od liczby powiększających się wymiarów, a skończywszy na rodzajach pojawiających się sił i cząstek. To sprawia, że przeszłość zależy od teraźniejszości, stanowiąc dalszą redukcję przyczynowości, wykraczającej daleko poza to, co wyobrażał sobie Bohr.

Oczywiście jesteście doskonale zaznajomieni z rozumowaniem retrospektywnym obecnym w naszym myśleniu o innych warstwach ewolucji, od ewolucji biologicznej po historię ludzkości. Pokrótkę opisałem w rozdziale 1, jak historia na wszystkich poziomach jest kształtowana przez przypadkowe wyniki niezliczonych rozgałęzień. Te zamrożone przypadki wzbogacają badanie historii o element retrospektywny, gdyż ogromne ilości informacji, które wspólnie zawierają, po prostu nie występują w prawach niższego rzędu. Można je zdobyć *ex post facto* tylko za pomocą eksperymentów i obserwacji.

W rozdziale 1 przypominałem, jak darwinowska ewolucja zmyślnie łączy wyjaśnienia przyczynowe z rozumowaniem retrospektywnym w jeden spójny schemat. Zaryzykuję twierdzenie, że w podobny sposób, wykorzystując odgórne podejście do kosmologii zawarte w połączonym tryptyku na ilustracji

43, znaleźliśmy złoty środek między „dlaczego” i „jak” w kosmologii. Jak zobaczymy, schemat przewidywania obecny w tryptyku jest na tyle ogólny i elastyczny, że zawiera głębsze pytania dotyczące zagadki projektu.

Retroaktywny charakter kosmologii kwantowej sięga więc dużo głębiej niż retrospektywny charakter ewolucji biologicznej. Biolodzy nie mówią o wielu drzewach życia współistniejących w widmowej superpozycji, dopóki nie znajdą dowodów kopalnych wyróżniających jedno z nich. Zamiast tego słusznie zakładają, że przez cały czas byliśmy częścią określonego drzewa życia i że po prostu nie wiemy którego, dopóki nie połączymy dowodów w jedną całość. Ta różnica wynika z faktu, że można bezpiecznie ignorować fundamentalną warstwę kwantową w ewolucji biologicznej. W każdym punkcie rozgałęzienia ewolucji darwinowskiej różne możliwe ścieżki ewolucyjne natychmiast oddzielają się od siebie, ponieważ oddziałujące środowisko, w którym rozwija się życie, momentalnie usuwa wszelkie interferencje kwantowe. Oznacza to, że środowisko nieustannie przekształca — krok po kroku — superpozycję drzew życia w wyraźnie odrębne drzewa ewolucyjne, z których jedno jest nasze. Tak naprawdę potrzeba ułamka sekundy, aby mutacja genu wywołana zdarzeniem kwantowym uległa dekoherencji. Dlatego nasze drzewo życia wyewoluowało niezależnie od drzew alternatywnych na długo przed tym, zanim biolodzy postanawiają odkopać skamieniałości, próbując zrekonstruować drzewo, do którego należą. Środowisko fizyczne dokonało już bardziej fundamentalnej obserwacji kwantowej. Nie oznacza to oczywiście, że nasza świadomość drzewa życia jest nieistotna, ponieważ w przeciwieństwie do środowiska biolodzy mogą interpretować swoje odkrycia i być może nawet wykorzystywać tę wiedzę do wpływania na przyszłe rozgałęzienia.

Tymczasem kosmologia kwantowa zadaje pytania o samo pochodzenie środowiska fizycznego. Schodzi aż do poziomu kwantowej obserwacji i stara się tego dokonać w odległej erze Wielkiego Wybuchu, gdzie obserwowalność ma wpływ na to, jakie powstają prawa fizyki. Kluczowe jest tutaj wplecenie

się w widmowy świat superpozycji. Przenosi ono rozumowanie wstecz w czasie ze zwykłego elementu retrospektywnego w badaniu tej historii do składnika retroaktywnego, który **t w o r z y** tę historię.

To właśnie na tym głębszym poziomie włókna łączące ze sobą kluczowe składniki tryptyku stają się niezwykle ważne, a schemat jako całość wynosi nas daleko poza tradycyjną fizykę.

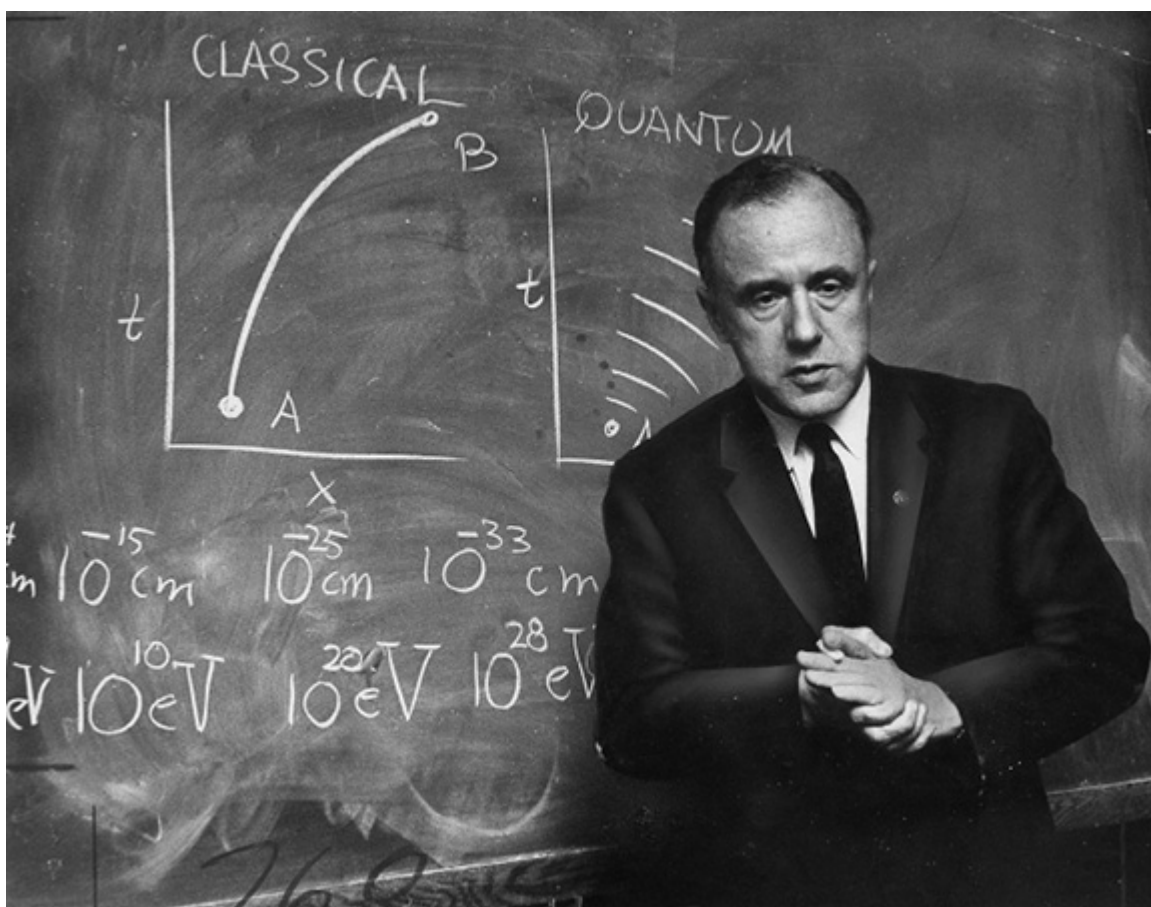
Pod koniec lat siedemdziesiątych John Wheeler wymyślił wspaniały *Gedankenexperiment*, który przyczynił się w istotny sposób do wyjaśnienia ciekawego elementu wstecznej przyczynowości we wszechświecie kwantowym. Eksperyment myślowy Wheelera dowiódł, w jaki sposób akt obserwacji w zwykłej mechanice kwantowej może subtelnie sięgać w przeszłość — nawet bardzo odległą.

Wheeler, mentor zarówno Feynmana, jak i Everetta, pracował z Bohrem nad rozszczepieniem jądra atomowego, zanim dołączył do projektu Manhattan podczas drugiej wojny światowej. Na Uniwersytecie w Princeton w latach pięćdziesiątych wskrzesił badania nad ogólną teorią względności, rozpoczynając tam, gdzie przerwał je Einstein. Ze względu na zaledwie jeden precyzyjny eksperyment obserwacyjny — zmianę położenia peryhelium Merkurego — oraz dwa testy jakościowe — ekspansję wszechświata i ugięcie promieni świetlnych — ogólna teoria względności stała się w owym czasie zaściankiem fizyki, często uważanym za dziedzinę matematyki, i to nawet niezbyt ciekawą. Ale, jak ujął to Wheeler, teoria względności jest zbyt ważna, aby pozostawić ją matematykom, więc postanowił ożywić tę dziedzinę. Wheeler prowadził pierwszy kurs teorii względności w Princeton, w ramach którego odbywała się coroczna wycieczka dla wybranych, o której marzył każdy student fizyki: wizyta u Alberta Einsteina w jego domu przy Mercer Street, gdzie można było się napić herbaty i podyskutować.

Podobnie jak Stephen, Wheeler wydawał się żywić nieograniczony naukowy optymizm. Jego pomysłowe wizje i zdolność do koncentracji na

najważniejszych pytaniach w fizyce inspirowały kierunki badań w kolejnych dziesięcioleciach. Kiedy zmarł w 2008 roku w wieku dziewięćdziesięciu siedmiu lat, w nekrologu „New York Timesa” zacytowano słowa Freemana Dysona: „Poetycka postać Wheelera przypomina proroka stojącego niczym Mojżesz na szczycie Pisga, spoglądającego na ziemię obiecaną, którą pewnego dnia przejmie jego lud”.

W swoim *Gedankenexperiment* dotyczącym roli obserwacji i przyczynowości w teorii kwantowej Wheeler rozważał cząstki, a nie wszechświaty, ponieważ z cząstkami nieco łatwiej jest się obchodzić. Jego eksperyment myślowy znany jest dziś jako **e k s p e r y m e n t z o p ó ź n i o n y m w y b o r e m**. Jest to odmiana doświadczenia z podwójną szczeliną, które po raz pierwszy zostało wykonane przez angielskiego erudyty Thomasa Younga w XVIII wieku. We współczesnej wersji doświadczenia Younga światło wchodzi przez dwie równoległe szczeliny wycięte w przegrodzie i pada na płytę fotograficzną znajdującą się za szczelinami. Daje to obraz interferencyjny jasnych i ciemnych prążków na płycie, ponieważ fale świetlne muszą pokonać nieco inną odległość od każdej szczeliny do danego punktu na ekranie. Kwantowa natura światła ujawnia się, gdy zdecydowanie osłabimy źródło światła, redukując fale do skąpego strumienia fotonów emitowanych jeden po drugim. Podobnie jak w eksperymencie z elektronami opisanym przeze mnie w rozdziale 3, przybycie każdego fotonu na ekran objawia się jako plamka na płycie. Ale jeśli będziemy prowadzić ten eksperyment przez jakiś czas w tym trybie ekstremalnie niskiego natężenia, to zbiór zderzeń fotonów z płytą zaczyna tworzyć wzór interferencyjny. Mechanika kwantowa przewiduje ten wynik, ponieważ opisuje każdy foton jako propagującą funkcję falową, która dzieli się na fragmenty w szczelinach, rozchodzi się i nakłada na siebie po drugiej stronie, tworząc wzór wysokiego i niskiego prawdopodobieństwa trafienia w płytę każdego fotonu.



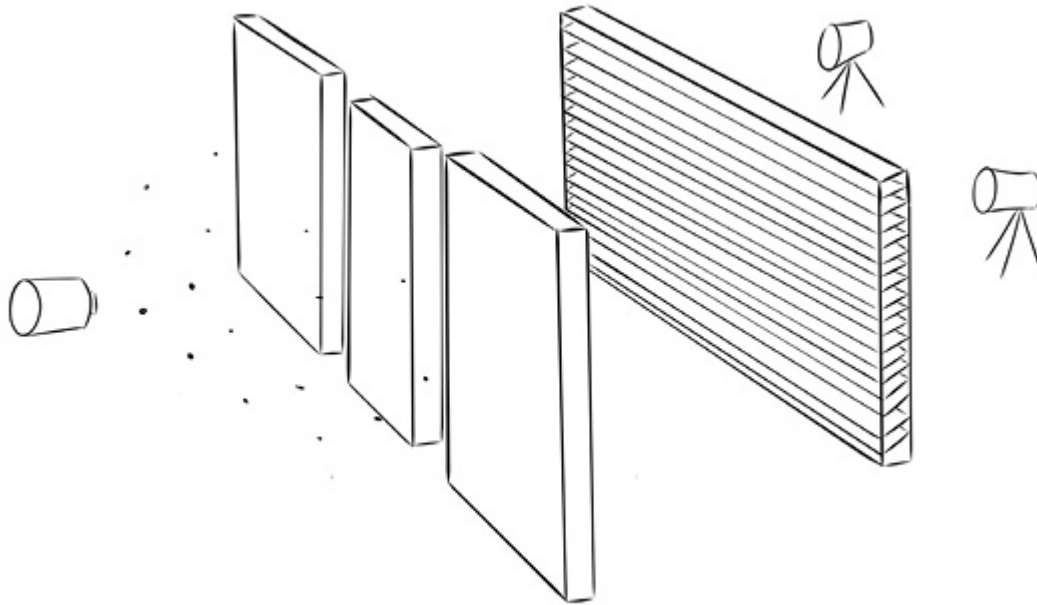
II. 44. John Wheeler w Princeton w 1967 roku prowadzący wykład na temat różnic między mechaniką klasyczną i kwantową.

Jeśli jednak eksperymentator postanowi „oszukiwać”, montując detektor w pobliżu każdej szczeliny mający śledzić, czy fotony podążają jedną ścieżką czy drugą — czy może oboma naraz — to wzór interferencyjny zniknie. Zamiast tego plamki po fotonach będą układać się na płycie w dwa jasne paski stanowiące sygnaturę dwóch wyraźnie odrębnych, klasycznych ścieżek — prowadzących przez jedną lub drugą szczelinę. Dzieje się tak, ponieważ podobnie jak środowisko cząstek w konfiguracji pokazanej na ilustracji 42, umieszczenie detektorów w pobliżu szczelin sprowadza się do dokonania aktu obserwacji, który powoduje rozdzielenie fragmentów fal wychodzących z obu szczelin. Detektory, zadając pytanie, przez którą szczelinę przechodzą fotony,

wymuszają na funkcjach falowych fotonów ujawnienie korpuskularnej natury światła.

Tymczasem Wheeler wymyślił pomysłową odmianę eksperymentu Younga, w której detektory nie są umieszczane w pobliżu szczelin, lecz blisko płyty fotograficznej (zob. il. 45). W istocie zastąpił płytę żaluzją i umieścił za nią parę detektorów skierowaną na każdą ze szczelin. Jeśli zamkniemy żaluzję, eksperyment działa jak poprzednio: fragmenty funkcji falowej mieszają się i tworzą wzór interferencyjny. Jeśli zaś otworzymy żaluzję, fotony przelatują przez płytę, a detektory można wykorzystać do sprawdzenia, z której szczeliny wyszły. W ten sposób eksperymentator może decydować dla każdego fotonu osobno, w jakim trybie przeprowadzić eksperyment — to znaczy jakie zadać pytanie — i tym samym, czy ujawnić jego korpuskularną, czy też falową naturę.

Kluczowym spostrzeżeniem Wheelera było to, że można **o p ó ź n i ć d e c y z j ę** otwarcia bądź zamknięcia żaluzji aż do momentu, gdy foton dotrze do płyty. To bardzo interesująca sytuacja. Skąd fotony po przybyciu do przegrody wiedzą, czy zachowywać się jak fala i podróżować obiema drogami, czy jak cząstka i poruszać się tylko jedną, w zależności od przyszłego wyboru eksperymentatora? Najwyraźniej fotony nie mogą z góry wiedzieć, czy eksperymentator później otworzy, czy zamknie żaluzję. Nie mogą też jednak opóźniać własnej decyzji, czy mają być falą, czy cząstką, ponieważ jeśli foton ma być przygotowany na możliwość zamknięcia żaluzji, jego funkcja falowa musi się rozdzielić na przegrodzie, aby kombinacja obu fragmentów mogła wytworzyć obserwowany wzór interferencyjny. Wydaje się to jednak ryzykowne, bo gdyby jednak okazało się, że zasłona jest otwarta, bo eksperymentator zdecydował się w ostatniej chwili, że chce poznać drogę fotonu, foton interferujący jako fala mógłby się znaleźć w kłopotliwej sytuacji.



II. 45. Odmiana eksperymentu Younga z podwójną szczeliną z cząstkami światła, w którym płyta fotograficzna po prawej stronie jest zamieniona w żaluzję, a za nią znajduje się para detektorów, z których każdy jest skierowany na jedną ze szczelin. Aż do momentu, w którym każdy pojedynczy foton dotrze do żaluzji, eksperymentator może opóźnić swoją decyzję, czy pozostawić żaluzję zamkniętą i przeprowadzić zwykły eksperyment z podwójną szczeliną dający prążki interferencyjne, czy też otworzyć ją i sprawdzić, przez którą szczelinę przeleciał foton. Można by pomyśleć, że to zdezorientuje foton. Wcale nie: natura jest inteligentna, fotony zawsze zachowują się właściwie, dowodząc, że akt obserwacji w teorii kwantowej subtelnie sięga w przeszłość.

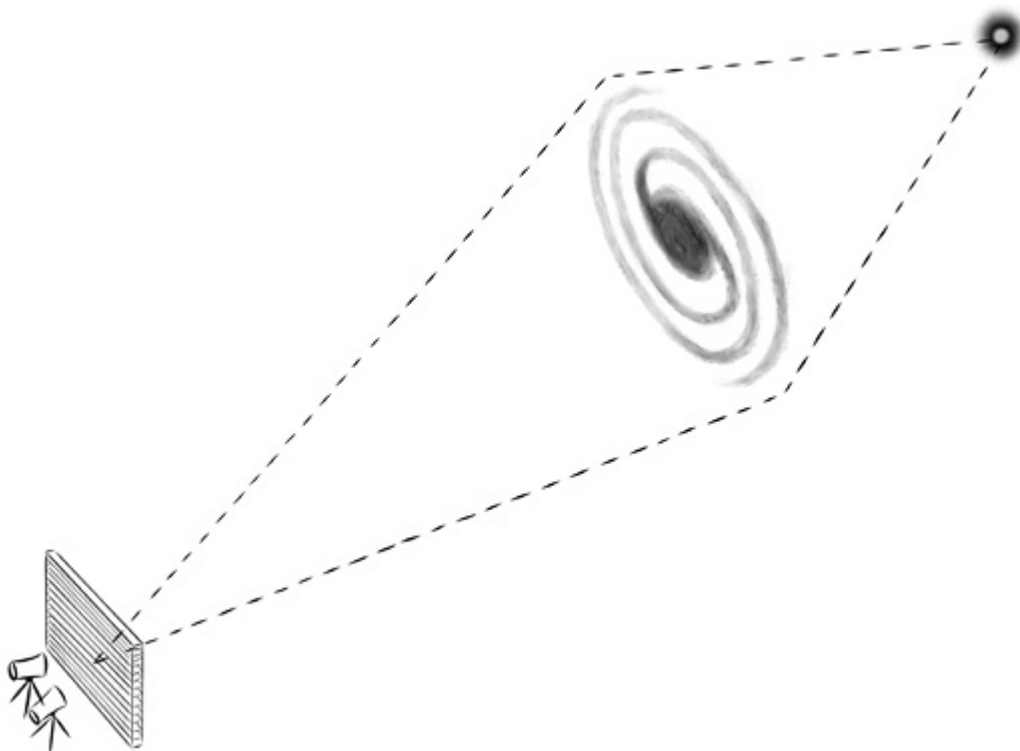
Co ciekawe, eksperyment myślowy Wheelera został już wykonany. W 1984 roku fizycy doświadczalni z Uniwersytetu w Maryland użyli zaawansowanej technologicznie żaluzji w postaci ultraszybkiego przełącznika elektronicznego wbudowanego w płytę fotograficzną w celu przełączania między tymi dwoma trybami działania. Byli w stanie potwierdzić sedno idei Wheelera: fotony trafiające na żaluzję powodują powstanie wzoru interferencyjnego; te, które są przepuszczone, nie wytwarzają go. W jakiś sposób fotony zawsze zachowują się poprawnie, nawet jeśli decyzja o włączeniu lub wyłączeniu detektorów

śledzących ich drogę jest późniejsza od momentu przejścia danego fotonu przez przegrodę.

Jak to możliwe? Ponieważ nieobserwowana przeszłość w mechanice kwantowej istnieje tylko jako spektrum możliwości — jako funkcja falowa. Podobnie jak elektrony lub cząstki pochodzące z rozpadu promieniotwórczego, rozmyte funkcje falowe fotonów przekształcają się w określoną rzeczywistość tylko wtedy, gdy przyszłość, której dają początek, jest w pełni ustalona, czyli zaobserwowana. Eksperyment z opóźnionym wyborem ilustruje w wyraźny i efektowny sposób, że proces obserwacji w mechanice kwantowej wprowadza do fizyki subtelną formę teleologii, element cofania się w czasie. Tego rodzaju eksperymenty i obserwacje przeprowadzane przez nas — będące pytaniami, które zadajemy przyrodzie — przekształcają wstecz w czasie to, co mogło się wydarzyć, w to, co się wydarzyło, a tym samym biorą udział w wyznaczaniu tego, co wiemy o przeszłości.

Wheeler, wieczny optymista, snuł nawet spekulacje na temat wielkoskalowej wersji swojego eksperymentu z opóźnionym wyborem (zob. il. 46). Wyobraził sobie zakrzywienie grawitacyjne światła z odległego kwazara przez masę leżącą na jego drodze galaktyki, która następnie kieruje je w stronę Ziemi. Zaobserwowano liczne przykłady takich soczewek grawitacyjnych i są one rutynowo wykorzystywane przez astronomów, by dowiedzieć się więcej o ilości ciemnej materii i ciemnej energii we wszechświecie. Ugięcie oznacza, że fotony z kwazara mogą dotrzeć do Ziemi więcej niż jedną ścieżką, omijając leżącą na ich drodze galaktykę na różne sposoby, naśladując sytuację znaną z eksperymentu z dwoma lub większą liczbą szczelin. Wheeler uważał, że gdyby astronomowie mogli przeprowadzić eksperyment z opóźnionym wyborem w tym kosmicznym układzie, byłiby w stanie kształtować przeszłość miliardy lat temu, sięgając do ery przed uformowaniem się Układu Słonecznego. „Jesteśmy nieuchronnie

zaangażowani w kształtowanie tego, co wydaje się dziać”¹⁹ — napisał Wheeler. I dodał:



Il. 46. Wersja eksperymentu z podwójną szczeliną z opóźnionym wyborem w skali kosmicznej. Soczewkowanie grawitacyjne galaktyki zakrzywia światło pochodzące z odległego kwazara, tworząc wiele ścieżek tego światła, którymi może dotrzeć do Ziemi, odtwarzając konfigurację eksperymentu z podwójną (lub nawet potrójną) szczeliną.

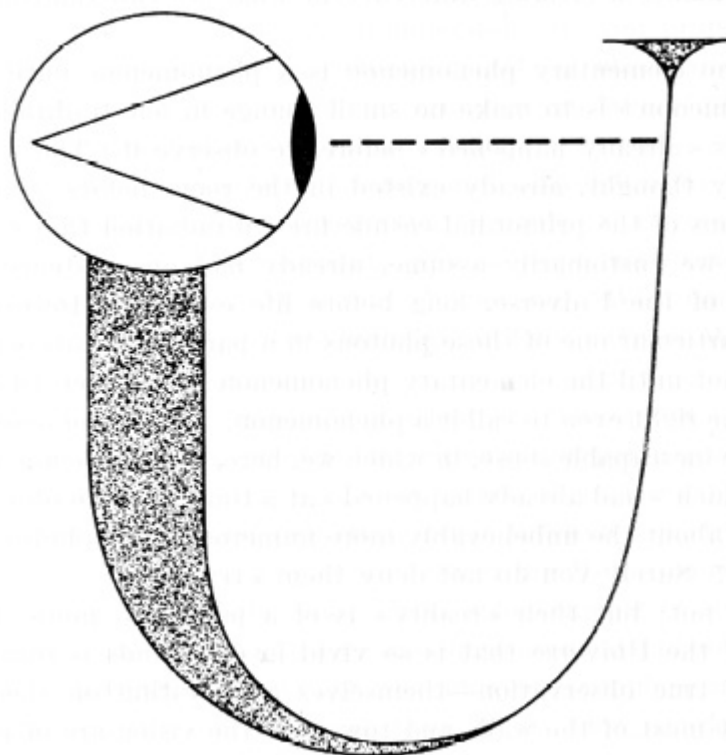
Nie jesteśmy jedynie widzami.

Jesteśmy uczestnikami.

W jakiś osobliwy sposób jest to wszechświat demokratyczny.

A potem wykonał tę niezwykłą ilustrację (il. 47) przedstawiającą ewolucję wszechświata jako obiektu w kształcie litery U, z okiem na jednym końcu wpatrującym się we własną przeszłość po drugiej stronie, aby pokazać, że

w kwantowym wszechświecie dzisiejsze obserwacje nadają namacalną rzeczywistość wszechświatowi „kiedyś”²⁰.



II. 47. Wheeler myślał o wszechświecie kwantowym jako o czymś w rodzaju samowzbudnego obwodu. Zaczynając od małych rozmiarów w prawym górnym rogu, wszechświat rośnie w czasie i ostatecznie daje początek obserwatorom, których akty obserwacji nadają namacalną rzeczywistość przeszłości, nawet tej odległej, kiedy obserwatorzy nie istnieli.

Niezrozumiana w czasach Wheelera jego wizja demokratycznego wszechświata w końcu znalazła swoje miejsce czterdzieści lat później w samym sercu **k o s m o l o g i i o d g ó r n e j**. Hawking potraktował udział obserwatora Wheelera poważnie — bardzo poważnie — i zastosował to nie tylko do określania ścieżek cząstek kwantowych wstecz w czasie, ale do całego wszechświata.

Tryptyk na ilustracji 43 wiąże obserwowalność z dynamiką i warunkami w nowe ramy pojęciowe dla kosmologii. Ta synteza nie jest jedynie przypisem

ani drobną korektą równania, lecz fundamentalnym uogólnieniem samej fizyki. Unifikując dynamikę i warunki brzegowe, tryptyk odchodzi od dualizmu, który dominował we współczesnej fizyce od momentu jej powstania. Dzięki włączeniu obserwowalności rezygnuje z pogoni za widokiem znikąd.

Odgórny charakter kosmologii kwantowej **nie** oznacza jednak, że możemy wysłać sygnały wstecz w czasie. Obserwowalność nadaje wyraźniejsze istnienie przeszłości, ale nie przekazuje żadnej informacji do tyłu w czasie. W wersji eksperymentu z opóźnionym wyborem Wheelera w kosmicznej skali włączanie lub wyłączanie naszych teleskopów w XXI wieku nie wpływa na ruch fotonów miliardy lat temu. Kosmologia kwantowa nie zaprzecza, że przeszłość się wydarzyła, natomiast doprecyzowuje, co to znaczy „stać się”, i w szczególności co można, a czego nie można powiedzieć o przeszłości.

Wheeler lubił ilustrować swoją wizję wariantem gry w dwadzieścia pytań. W tej zabawie grupa znajomych siada po obiedzie w salonie. Jedna osoba zostaje wysłana do innego pomieszczenia. Pod jej nieobecność pozostali postanawiają zagrać w tę grę z niespodzianką: umawiają się nie wybierać określonego słowa, ale działać tak, jakby je między sobą uzgodnili. Kiedy pytający wraca i zadaje swoje pytania na „tak lub nie”, każdy pytany odpowiada zgodnie z własnym widzimisię, jedynie pod warunkiem, że odpowiedź musi być zgodna z poprzednimi. Tak więc na dowolnym etapie gry każda osoba w pokoju ma na myśli słowo, które jest spójne ze wszystkimi udzielonymi wcześniej odpowiedziami. Oczywiście kolejne pytania szybko zawężają możliwości, aż zarówno pytający, jak i pytani są niejako prowadzeni za rękę i nakierowywani na pewne słowo. Jednak to słowo zależy od pytań zadawanych przez pytającego, a nawet od ich kolejności. O tym wariacie gry Wheeler powiedział: „Żadne słowo nie jest słowem, dopóki to słowo nie zostanie powołane do istnienia przez wybór zadawanych pytań i udzielonych odpowiedzi”²¹.

W podobny sposób wszechświat kwantowy nieustannie układa się w całość — kawałek po kawałku — z oparów możliwości, niczym las wyłaniający się z mgły w wilgotny szary poranek. Jego historia nie jest tym, w jaki sposób myślimy o historii jako o ciągu zdarzeń dziejących się jedno po drugim. Jest raczej wspaniałą syntezą obejmującą nas, w której to, co się teraz wydarza, wstecznie kształtuje to, co zdarzyło się wcześniej. Ten odgórny element obdarza obserwatorów, w sensie kwantowym, subtelną rolą twórczą w sprawach kosmicznych. Nasyca kosmologię delikatną nutą subiektywności. Poprzez nasze obserwacje jesteśmy w dosłowny sposób zaangażowani w tworzenie kosmicznej historii.

„Bez pytań nie ma odpowiedzi!” — powiedział Wheeler o cząstkach kwantowych. „Bez pytań nie ma historii!” — powiedział Hawking o wszechświecie kwantowym.

Drugi etap rozwoju kosmologii odgórnej, którego to określenia lubił używać Stephen²², trwał od 2006 do 2012 roku. W tym okresie Hawking rozwinął głębokie przekonanie, że dzięki obserwatorom jako czynnikom sprawczym włączonym w nasz schemat pojęciowy w końcu znaleźliśmy się na drodze do teorii kosmologicznej zdolnej wyjaśnić zagadkę projektu. Gdybyśmy tylko mogli zrozumieć, co dokładnie tryptyk próbuje nam powiedzieć.

Pamiętajmy, że oddolna strategia uchwycenia biofilnej natury wszechświata wygląda następująco: zaczynamy od bryłki przestrzeni na początku czasu; stosujemy odwieczne i obiektywne prawa (lub metaprawa) fizyki; obserwujemy ewolucję wszechświata (multiświata); mamy nadzieję, że otrzymamy coś podobnego do tego, w czym żyjemy. Jest to tradycyjny sposób rozumowania w fizyce, powszechnie stosowany w eksperymentach laboratoryjnych i w klasycznej kosmologii. Rozumowanie oddolne poszukuje fundamentalnie przyczynowego wyjaśnienia przyjaznych życiu właściwości wszechświata na podstawie pewnej przypominającej prawo struktury absolutów. Pierwszą oddolną próbą rozwiązania zagadki projektu było

poszukiwanie ponadczasowej prawdy matematycznej w jądrze istnienia. Druga linia ataku, kosmologia multiświata, również opierała się na ponadczasowych metaprawach, ale wzmocnionych antropicznym wyborem zamieszkiwalnych wszechświatów wyspowych.

Kosmologia odgórna wywraca zagadkę projektu do góry nogami. Już na samym początku miesza składniki w zupełnie innej kolejności. Przepis, który uzyskujemy z tryptyku, brzmi mniej więcej tak: rozejrzyjmy się wokół siebie; określmy jak najwięcej przypominających prawa wzorców w swoich danych; użyjmy ich do stworzenia historii wszechświata prowadzących do obserwowanego przez nas dzisiaj; połączmy je razem, aby stworzyć naszą przeszłość. Tak więc, zamiast tłu absolutów, kosmologia odgórna nadaje priorytet historycznej naturze wszystkiego.

Ta teoria sprowadza przystosowanie do pojawienia się życia ostatecznie do faktu, że głęboko na poziomie kwantowym namacalny wszechświat i obserwatorzy są ze sobą powiązani. Zasada antropiczna staje się zbędna, ponieważ rozumowanie odgórne omija otchłań — charakterystyczną dla myślenia oddolnego — oddzielającą nasze teorie wszechświata od naszej perspektywy mrówki wewnątrz niego. Na tym polega użyteczność kosmologii odgórnej i, jak uważał Stephen, jej rewolucyjny potencjał.

Tak więc wyposażeni w tryptyk udaliśmy się w dalszą drogę. *Co zrobimy dziś z modelem odgórnym?* — Stephen często pół żartem, pół serio pytał mnie o poranku.

Tymczasem, aby dotrzeć do jądra wczesnej fazy kwantowej wszechświata, musimy przejść wstecz przez wiele poziomów złożoności, które oddzielają nas od początku. Można to zrobić, śledząc ewolucję wszechświata w tył w czasie. Na początku pozostawiamy za sobą ludzkie i wielokomórkowe warstwy życia oraz nieliczne przypominające prawa zasady, do których się stosują. Następnie tracimy z oczu prymitywne formy życia, a w końcu także niżej leżące warstwy geologiczne, astrofizyczne, a nawet chemiczne. Wreszcie dochodzimy do

gorącej epoki Wielkiego Wybuchu, w której ewolucyjny charakter praw fizycznych wysuwa się na pierwszy plan. Na te właśnie tereny Stephen chciał się zapuścić.

Cofnijmy powierzchnię obserwacji blisko końca inflacji — zaproponował — zaledwie ułamek sekundy po rozpoczęciu ekspansji. Popatrzmy stamtąd wstecz.

Wyposażony w odgórny tryptyk, niczym teoretyczny mikroskop na tyle potężny, by przeanalizować ten najniższy poziom, Stephen szykował się do najbardziej ambitnego eksperymentu myślowego w historii. Z mnóstwem możliwych ścieżek w zanadru kosmologia kwantowa w pewnym sensie wyjaśnia klasyczną osobliwość Wielkiego Wybuchu. Pojawia się oszałamiający głębszy poziom ewolucji, przenoszący nas do Wielkiego Wybuchu. Na tym poziomie dostrzegamy pewien rodzaj „metaewolucji”, etapu, w którym znane prawa ewolucji ewoluują. Jak opisałem w rozdziale 5, darwinowski rozgałęziony proces zmienności i selekcji rozgrywający się w tej pradawnej warstwie oznacza, że wynik można zrozumieć tylko z perspektywy czasu. Ta prawdziwie pradawna warstwa ewolucji musi być traktowana odgórnie — spoglądając wstecz w czasie.

Weźmy pod uwagę liczbę dużych wymiarów przestrzeni. Zgodnie z teorią strun sfera możliwości zawiera historie kosmologiczne o każdej możliwej liczbie dużych wymiarów — od 0 do 10. Nie znaleziono żadnego pierwotnego powodu, dla którego dokładnie trzy wymiary urosły, a reszta nie. Dlatego filozofia oddolna nie może wyjaśnić, dlaczego nasz wszechświat powinien mieć trzy duże wymiary. Jednak podejście odgórne mówi, że to nie jest właściwe pytanie. Kosmologia odgórna odnosi wstecz obserwację dokonaną przez najbardziej pierwotne środowisko w najwcześniejszych etapach ekspansji, że trzy wymiary wyłoniły się i zaczęły uczestniczyć w inflacji, wybierając te nieliczne historie ze wszystkich możliwych, które kończą się trzema dużymi wymiarami. Rozkład prawdopodobieństwa liczby wymiarów nie miałby znaczenia, ponieważ „my” już zmierzylimy, że żyjemy we

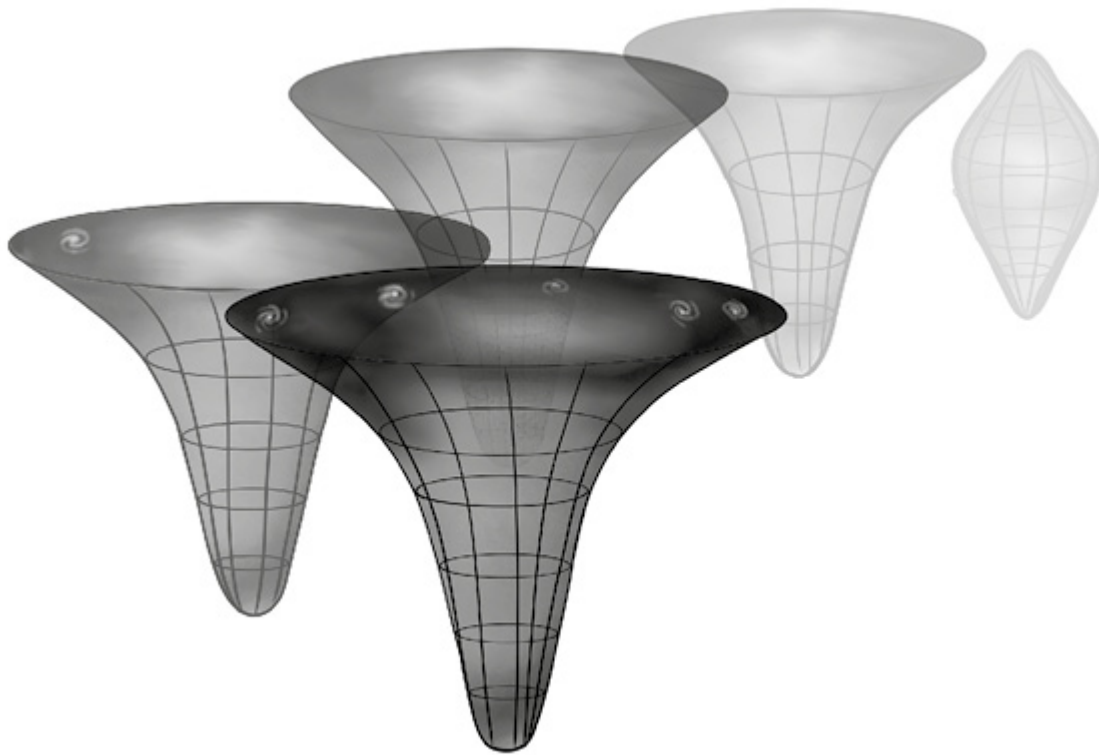
wszecławwiecie o trzech dużych wymiarach przestrzeni. Byłoby to jak pytanie o prawdopodobieństwo drzewa życia w porównaniu z zupełnie innymi drzewami, również tymi bez gałęzi *Homo sapiens*. Nie jest to ani istotne, ani obliczalne. Dopóki sfera możliwych historii ekspansji zawiera jakieś wszechświaty, w których rozszerzają się trzy wymiary, nie ma znaczenia, jak rzadkie są one w porównaniu z historiami o dowolnej innej liczbie wymiarów. Co więcej, dzieje się tak niezależnie od tego, czy trzy to jedyna liczba odpowiednia dla życia. Uczyniwszy zasadę antropiczną nieaktualną, kosmologia odgórna w istocie traktuje przyjazne życiu właściwości antropiczne i nieantropiczne na równych prawach ze wszystkim innym²³.

To samo dotyczy modelu standardowego fizyki cząstek elementarnych. Według wielkiej unifikacji i teorii strun model standardowy z mniej więcej dwudziestoma precyzyjnie dostrojonymi parametrami z pewnością nie jest jedynym rezultatem kolejnych łamiących symetrię przejść w gorącym Wielkim Wybuchu. W rzeczywistości istnieje coraz więcej dowodów na to, że ścieżki kończące się modelem standardowym są niezwykle rzadkie w domenie teorii strun, tak jak drzewo życia na Ziemi jest przypuszczalnie niezwykle rzadkie wśród wszystkich możliwych drzew. Dlatego po raz kolejny przyczynowe podejście oddolne nie wyjaśnia, dlaczego ostatecznie to model standardowy powinien opisywać ewolucję wszechświata. Paradygmat podejścia odgórnego próbuje znaleźć odpowiedź na to pytanie w bardzo odmienny sposób. Przewiduje, że obserwacje „przeprowadzane” we wczesnym wszechświecie — których skutki są zapisane w zamrożonych przypadkach składających się na obowiązujące prawa — wybierają historie zgodne z modelem standardowym spośród szerokiego spektrum wszystkich możliwych historii kosmologicznych.

Być może jednak najbardziej uderzająca konsekwencja poglądu odgórnego wiąże się z siłą pierwotnego wzrostu inflacji. Pamiętajmy, że jako teoria oddolna hipoteza braku brzegów przewidywała absolutnie minimalną wielkość inflacji, ledwie wystarczającą do zaistnienia wszechświata.

Zdecydowanie najbardziej wyróżniającymi się odnogami funkcji falowej braku brzegów są prawie puste wszechświaty, które pojawiają się ze śladową inflacją (zob. il. 31). Oznacza to, że jeśli zapomnimy o tym, że jesteśmy istotami rozumnymi zbudowanymi z atomów i zanurzonymi w czasoprzestrzeni, i przez chwilę przyjmimy boską perspektywę, patrząc na kształt fali braku brzegów, **t a k j a k b y ś m y** nie byli jej częścią, to stwierdzimy, że nie powinniśmy istnieć. Dla Stephena ten stan rzeczy stanowił od dziesięcioleci największy problem w kosmologii. Hipotezę braku brzegów uważał za słuszną — nawet bardzo — ale jednak wydawała się błędna.

Przejdźmy do modelu odgórno. Przyjmując perspektywę mrówki, odgórna kosmologia rozumuje odwrotnie i do tyłu w czasie. I co się dzieje? Całkowicie zmienia się kształt fali braku brzegów. Podejście odgórne tłumi fragmenty fali odpowiadające pustym wszechświatom i wzmacnia wszechświaty znajdujące się w odległym ogonie fali braku brzegów, które rodzą się z silnym wzrostem inflacji — widzimy to na ilustracji 48. Porównanie ze spojrzeniem oddolnym na falę braku brzegów na ilustracji 31 pokazuje, że całkiem dosłownie kosmologia odgórna zupełnie przetasowuje gałęzie tworzące funkcję falową. Co więcej, ponieważ amplitudy różnych fragmentów fal określają ich względne prawdopodobieństwo, oznacza to, że kosmologia odgórna w ramach wnioskowania wstecz mówi, że wszechświat rozpoczął się od gwałtownego wybuchu inflacji, zgodnie z obserwacjami²⁴. Najwyraźniej Stephen był zadowolony z tego, jak to wyszło.



II. 48. Kształt fali braku brzegów z perspektywy odgórnej. Patrząc z góry na dół, hipoteza braku brzegów przewiduje, że nasz wszechświat powstał z wielkim wzrostem inflacji, dając początek sieci galaktyk, zgodnie z naszymi obserwacjami. Niemal puste wszechświaty, które zdominowały falę oddolną (zob. il. 31), zanikają w dali.

Nareszcie — powiedział do mnie, dodając, jakbym nie zdawał sobie z tego sprawy: Zawsze miałem dobre przeczucia odnośnie do postulatu braku brzegów.

To niezwykle odwrócenie losów hipotezy braku brzegów dostarcza wyraźnej ilustracji, że na głębszym poziomie przeszłość jest uzależniona od terażniejszości. Ale jaka dokładnie jest rola teorii początku, jeśli i tak patrzymy na wszechświat z perspektywy odgórnej? Można powiedzieć, że hipoteza braku brzegów jest dla kosmologii tym, czym LUCA, ostatni uniwersalny wspólny przodek, jest dla ewolucji biologicznej. Oczywiście skład biochemiczny LUCA nie determinuje drzewa życia, które z niego

wyrośnie. Zarazem jednak nie może być drzewa życia bez LUCA. Podobnie początek pozbawiony brzegów ma kluczowe znaczenie dla istnienia wszechświata, ale nie przewiduje konkretnego drzewa praw, które wyłoni się z tak prostego początku²⁵. Zamiast tego szczegółowe zrozumienie genealogii kosmosu i jego praw można uzyskać jedynie na podstawie obserwacji — w perspektywie odgórnej.

Mówiąc inaczej, model początku jest kluczowym źródłem przewidywania na bardziej podstawowym poziomie. W podejściu odgórnym początki w kształcie czaszy widoczne na ilustracji 48 stanowią zasadnicze punkty zaczepienia dla niezliczonych możliwych ścieżek prowadzących do naszej przeszłości. Kosmologia kwantowa bez teorii początku byłaby jak CERN bez przyspieszanych cząstek, chemia bez tablicy pierwiastków lub drzewo życia bez pnia. Nie dałoby się formułować żadnych przewidywań. Każda drzewiasta struktura, która wyewoluowała z połączonymi ze sobą gałęziami, ostatecznie opiera się na idei wspólnego pochodzenia. Odnosi się to w takim samym stopniu do drzewa życia jak do drzewa praw. Ośmielam się twierdzić, że nie może być prawdziwej darwinowskiej rewolucji w kosmologii bez pojęcia prawdziwego początku. W istocie brak poprawnej teorii warunków początkowych na przykład w kosmologii multiświata może równie dobrze być głównym powodem, dla którego ta teoria niczego nie przewidywała.

Niemniej możemy się zastanawiać, co mamy nadzieję uzyskać, kształtując przeszłość na podstawie naszych obserwacji kosmologicznych, co oczywiście prowadzi z powrotem do tego, co obserwujemy. Jeśli kosmologia odgórna nie szuka przyczynowego wyjaśnienia, dlaczego wszechświat i jego obowiązujące prawa są tym, czym są, skoro nie **przewiduje**, że historia wszechświata musiała się tak potoczyć, jak się potoczyła, to na czym w zasadzie polega jej użyteczność?

Podobnie jak w ewolucji darwinowskiej, użyteczność tej teorii polega na jej zdolności do odsłonięcia wzajemnych powiązań kosmosu. Teoria ta pozwala nam określić nowe korelacje między tym, co może się wydawać niezależnymi

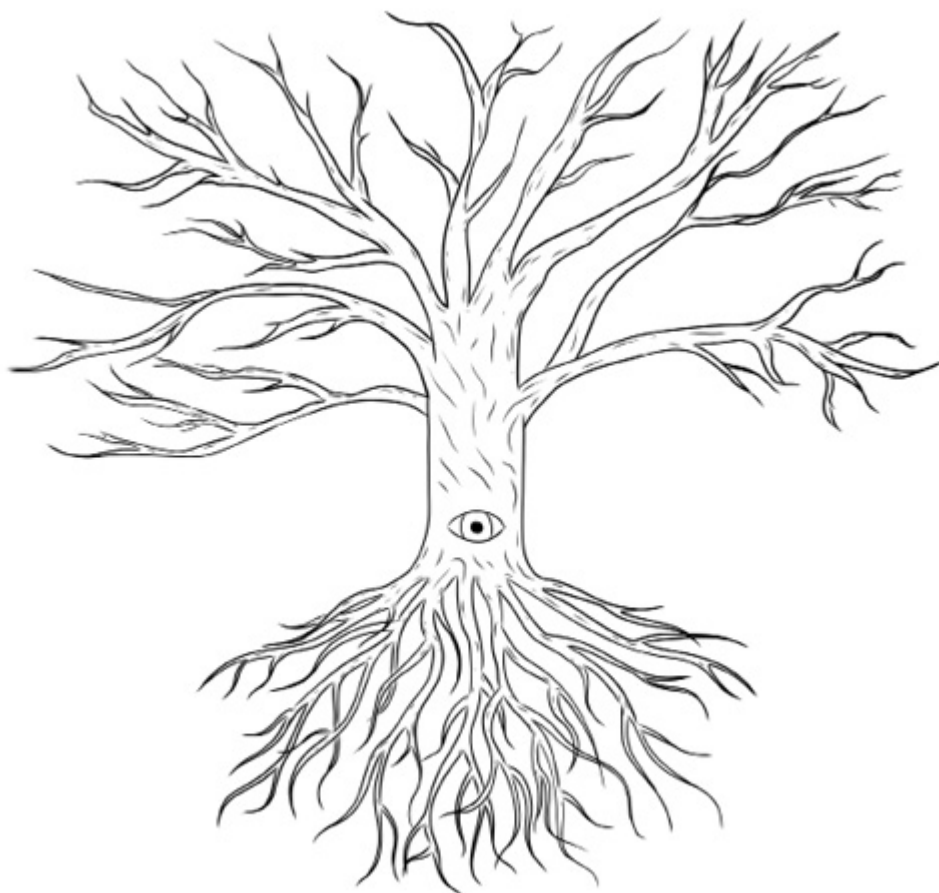
elementami naszych obserwacji. Weźmy pod uwagę zmiany temperatury w promieniowaniu CMB. Cechy statystyczne tych zmian pokrywają się niemal idealnie z właściwościami fluktuacji pojawiających się we wszechświatach z silnym wzrostem inflacji. Rozumując ogólnie, są to stanowczo najbardziej prawdopodobne wszechświaty. Stąd teoria ogólna przewiduje silną korelację między obserwowanymi zmianami CMB a innymi fragmentami naszych danych wybierającymi przede wszystkim przeszłość ze znacznym wzrostem inflacji. Poprzez tego rodzaju korelacje oraz przewidywania korelacji między obecnymi i przyszłymi danymi ogólna kosmologia ma wielki potencjał do odkrycia ukrytej spójności zakodowanej we wszechświecie. Dlatego właśnie ta teoria działa znacznie lepiej niż teoria multiświata z jej paradoksalną utratą przewidywalności²⁶.

Również jako obraz fizycznej rzeczywistości ogólny wszechświat różni się radykalnie od multiświata. W kosmologii multiświata gigantyczna, podlegająca inflacji przestrzeń pączkująca niezliczonymi wszechświatami wyspowymi jest po prostu gdzieś tam (zob. fot. 7 na wklejce). Ten kosmiczny gobelin istnieje niezależnie od tego, na których wyspach jest życie lub które są obserwowane. Obserwatorzy i ich obserwacje trafiają do tej teorii w wyniku efektu postselekcji, nie wpływając w żaden sposób na wielkoskalową strukturę kosmosu.

Natomiast we wszechświecie kwantowym Stephena w centrum akcji znajduje się obserwowalność. Tryptyk ogólny ustanawia subtelny związek łączący obserwatora z obserwowanym. Każdy rodzaj namacalnej przeszłości w kosmologii ogólnej jest zawsze przeszłością obserwatora.

To tak, jakby kosmologia kwantowa traktowała obserwowalność jako centralną bazę operacyjną w ramach niezgłębionej sfery wszystkich możliwych ścieżek. Próbowałem przywołać ten „światopogląd” na ilustracji 49 za pomocą jeszcze jednej rozgałęzionej struktury drzewiastej. Działamy i obserwujemy (w sensie kwantowym) i w wyniku tego zapuszczamy korzenie dokonujące wyboru możliwej przeszłości, a także wybranych kilku gałęzi

wyznaczających możliwą przyszłość. Fakt, że wszystkie korzenie na ilustracji 49 sięgają do naszej sytuacji obserwacyjnej — obejmując to, co wiemy o obowiązujących prawach — oznacza, że złożoność tej drzewiastej struktury błędnie w porównaniu ze złożonością multiświata. Ogromna większość wszechświatów wyspowych w żaden sposób nie przypomina wszechświata, który obserwujemy. Zatem odpowiadające im korzenie nie pojawiają się w drzewie kwantowym. Te historie wyspowe znikają — zagubione w oceanie nieoznaczoności.



II. 49. Kwantowy wszechświat. Dzisiejsze obserwacje zapuszczają korzenie możliwej przeszłości i zarysowują gałęzie możliwej przyszłości z rozległej sfery „tego, co może się zdarzyć”.

Muszę jednak podkreślić, że kosmologia odgórna pozostaje hipotezą. Znajdujemy się w sytuacji podobnej do sytuacji Darwina w XIX wieku,

z danymi zbyt skąpymi, by odtworzyć w każdym szczególe, jak drzewo praw wyłoniło się w gorącym Wielkim Wybuchu. Nasze dowody z tej odległej epoki pozostają niepełne. Weźmy pod uwagę ciemną materię lub ciemną energię, które razem stanowią 95 procent zawartości wszechświata. Jak wygląda kaskada procesów łamania symetrii, która doprowadziła do pojawienia się sił i cząstek rządzących tą ciemną sferą? Tylko czas da nam na to odpowiedź.

Biorąc pod uwagę tak ograniczone dowody, wśród moich kolegów kosmologów pozostają żarliwi predarwinieści, którzy niezmiennie trwają przy oddolnym poglądzie na świat. Utrzymują, że zadaniem kosmologii jest znalezienie prawdziwie przyczynowego wyjaśnienia rozsądnego projektu wszechświata. W ich filozofii przypadek i zdarzenia historyczne — nie mówiąc już o obserwowalności — schodzą na drugi plan. Zakładają, że w ten czy inny sposób wszechświat **m u s i a ł** się tak rozwinąć, opierając się na solidnych i niezmiennych zasadach. Filozofia odgórna kwestionuje tę przesłankę w jej ontologicznej istocie, traktując przypadek i konieczność — zamrożone przypadki i przypominające prawa wzorce — na równej stopie. Przewidujemy, że przyszłe obserwacje ujawnią o wiele więcej przypadkowych zwrotów akcji.

Kiedy jednak zastanawiam się nad długą drogą, która doprowadziła nas do odgórnej kosmologii, staje się jasne, że nie kierowaliśmy się przede wszystkim ogólnymi rozważaniami filozoficznymi. (Jak mogliśmy, mając Stephena w zespole). Zamiast tego po prostu szukaliśmy głębszego zrozumienia naukowego, motywowanego pragnieniem rozwiązania paradoksów multiświata i rozwikłania zagadki projektu. Prawdę powiedziawszy, po tym, jak Jim i Stephen w 1983 roku wysunęli swoją hipotezę braku brzegów, ich drogi się rozeszły. Stephen uważał, że rozumiemy mechanikę kwantową wystarczająco dobrze, i nie widział potrzeby dalszego zagłębiania się w jej podstawy. „Kiedy słyszę słowa «kot Schrödingera»,

sięgam po pistolet” — powiedział kiedyś, a następnie postanowił poddać testom swój postulat braku brzegów. Ale Jim nie był pewien, czy dobrze rozumiemy mechanikę kwantową, więc odwrócił się od kosmologii kwantowej. Współpracując z nieżyjącym już Murrayem Gell-Mannem, erudytą, który w 1964 roku zaproponował istnienie kwarków, Jim postanowił opracować kwantowe koncepcje Everetta dotyczące cząstek i pól materii. Ich praca u podstaw, w połączeniu z dorobkiem wielu innych fizyków²⁷, ostatecznie doprowadziła do pełnoprawnego nowego sformułowania teorii kwantowej znanego jako **m e c h a n i k a k w a n t o w a z d e k o h e r e n t n y m i h i s t o r i a m i**. To sformułowanie w istotny sposób wyjaśniło fizyczną naturę procesu rozgałęziania w modelu Everetta i, co najważniejsze, mocno włączyło obserwowalność do swojego schematu pojęciowego²⁸. Kiedy więc w 2006 roku zrozumiałem, że wnioski Jima i Stephena trzeba będzie ze sobą połączyć, jeśli kosmologia kwantowa miała wykorzystać cały swój potencjał, zebrałem je ponownie razem i to właśnie ten fortunny ruch zwiastował drugi etap rozwoju naszego podejścia odgórnego.

Prawdę mówiąc, uważam jednak, że tryptyk odgórny jest mniej więcej tym, co ostatecznie wyobrażali sobie Lemaître i Dirac w swoich poetyckich pionierskich rozważaniach na temat kosmologii kwantowej. W 1958 roku na Jedenastym Kongresie Solvaya dotyczącym struktury i ewolucji wszechświata Lemaître przedstawił referat o stanie hipotezy pierwotnego atomu²⁹. Po zauważeniu, że „rozszczerzenie atomu mogło nastąpić na wiele różnych sposobów” — rozgałęzienie Everetta! — i że „poznanie ich względnego prawdopodobieństwa byłoby mało interesujące” — brak typowości! — kontynuował: „Kosmologia dedukcyjna nie może się rozpocząć, zanim to rozszczerzenie nie posunie się wystarczająco daleko, aby osiągnąć praktyczny determinizm makroskopowy”. Innymi słowy, nasza rozszerzająca się gałąź musi ulec dekoherencji, aby podejście oddolne było realne. Lemaître zakończył swój referat tajemniczą uwagą: „Wszelkie informacje o stanie

materii w tym momencie [zaraz po rozszczepieniu atomu] muszą być wywnioskowane z warunku, że rzeczywisty wszechświat mógł z tego stanu wyewoluować” — co można uznać za wczesne rozważania o perspektywie odgórnej.

Jak widzimy, z wyjątkiem tych tajemniczych komentarzy, kosmologia odgórna znajduje swoje najbardziej namacalne podstawy w profetycznych eksperymentach myślowych Wheelera i jego wizji wszechświata demokratycznego.

W niedawnym hołdzie dla Wheelera³⁰ Kip Thorne wspomniał wspólny obiad z nim i Feynmanem w 1971 roku w Burger Continental niedaleko Caltechu, restauracji, którą Stephen też często odwiedzał:

Przy ormiańskim jedzeniu Wheeler opisał nam swój pomysł, że prawa fizyki są zmienne. „Te prawa musiały zostać powołane do istnienia [...] Jakie zasady określają to, które prawa pojawiają się w naszym wszechświecie?” — zapytał. Feynman, student Wheelera w latach czterdziestych, odwrócił się do Thorne’a, studenta Wheelera z lat sześćdziesiątych, i powiedział: „Ten facet gada jak szaleniec. Ludzie z twojego pokolenia nie wiedzą, że **z a w s z e** uchodził za wariata. Ale kiedy byłem jego studentem, odkryłem, że jeśli weźmiesz jeden z jego szalonych pomysłów i obedziesz z niego wszystkie warstwy szaleństwa, jak przy obieraniu cebuli, w samym sercu tego pomysłu często znajdziesz potężne jądro prawdy”.

Kiedy Stephen i ja rozpoczęliśmy pracę nad odgórnym podejściem do kosmologii, nie znałem pomysłów Wheelera, choć podejrzewam, że Stephen coś tam jednak o nich wiedział. Z perspektywy czasu widać, że usunęliśmy sporo warstw szaleństwa Wheelera, przekształcając jego wspaniałą ideę w poprawną hipotezę naukową.

Pojechaliśmy do Kolegium Gonville i Caius, koledżu Stephena i jego drugiej bazy w Cambridge. Był czwartek, a to oznaczało kolację w kolegium, po której następowały staroświeckie rytuały kadry naukowej przy serze i porto w wyłożonej boazerią świetlicy. Przy winie krążącym zgodnie z ruchem wskazówek zegara wokół długiego drewnianego stołu i trzaskającym ogniu w kominku rozmawialiśmy o jedwabnych szlakach. Stephen wspominał swoje podróże do Iranu latem 1962 roku; do Isfahanu i Persepolis, stolicy starożytnych królów perskich, i przez pustynię do Meszedu na wschodzie. *Załapałem się na trzęsienie ziemi w Buin-Zahra (potężne wstrząsy o sile 7,1 w skali Richtera, w których śmierć poniosło ponad dwanaście tysięcy ludzi) — powiedział nam — kiedy jechałem autobusem między Teheranem a Tebrizem w drodze powrotnej. Mimo to chciałbym tam wrócić — dodał. Współpraca naukowa nie powinna mieć granic.*

Kiedy kadra naukowa udała się do swoich pokoi i pielęgniarka Stephena namawiała nas, żebyśmy zrobili to samo, on tymczasem rozpoczął nocną dyskusję. Nie byłem tym zaskoczony. Wykorzystując swój program Equalizer, zaczął mówić. Obszedłem stół, by usiąść tuż obok niego.

Napisałem w „Krótkiej historii”...

Dokończyłem myśl za niego:

— ...że jesteśmy tylko chemiczną substancją na średniej wielkości planecie krążącej wokół przeciętnej gwiazdy w zwykłej galaktyce.

Uniósł brwi, przyznając mi rację.

To był dawny oddolny Hawking — pojawiło się na ekranie. Z boskiej perspektywy jesteśmy tylko nic nieznaczącą plamką.

Stephen zwrócił oczy w moim kierunku, jak gdyby zastanawiając się nad drogą, jaką przebył od tamtego czasu. A więc to by było na tyle — pomyślałem — oto jego pożegnanie ze światopoglądem, w który tak wiele zainwestował.

— Czas na zmianę światopoglądu? — zaproponowałem niepewnie. Na dziedzińcu rozległy się dźwięki dzwonu kaplicy uniwersyteckiej. Stephen

znów się zawahał. Postanowiłem nie próbować przewidywać, co powie, jeśli rzeczywiście chciałby coś powiedzieć.

W końcu ekran się rozświecił i znów rozległo się klikanie, tym razem powolne: *Stosując [podejście] odgórne, umieszczamy ludzkość z powrotem w centrum [teorii kosmologicznej]. Co ciekawe, właśnie to daje nam kontrolę.*

— We wszechświecie kwantowym to my włączamy światło — dodałem. Stephen uśmiechnął się, wyraźnie zadowolony z rysującego się na horyzoncie zupełnie nowego paradygmatu kosmologicznego.

Co za wspaniały zwrot akcji — pomyślałem. Rozpoczęliśmy poszukiwanie głębszego wyjaśnienia przystosowania wszechświata do pojawienia się życia w warunkach fizycznych na początku czasu. Ale kosmologia kwantowa, którą opracowaliśmy w tym celu, sugeruje, że patrzyliśmy w złym kierunku. Kosmologia odgórna uznaje, że podobnie jak drzewo życia w biologii, drzewo praw fizycznych w kosmologii jest wynikiem ewolucji podobnej do darwinowskiej, którą należy rozumieć wstecz w czasie. Późniejszy Hawking twierdził, że u samych podstaw nie chodzi o to, „dlaczego” świat jest taki, jaki jest — o jego fundamentalną naturę podyktowaną pewną transcendentálną przyczyną — ale o to, jak dotarliśmy tu, gdzie jesteśmy. Z tego punktu widzenia obserwacja, że wszechświat jest w sam raz dla życia, stanowi punkt wyjścia do wszystkiego innego. Łącząc ze sobą nie tylko grawitację i mechanikę kwantową — czyli to, co duże, i to, co małe — ale też dynamikę i warunki brzegowe, a także mrówczą perspektywę ludzkiego postrzegania kosmosu, tryptyk odgórny oferuje nowy rodzaj syntezy, która wreszcie odrywa kosmologię od punktu archimedesowego.

— Naprawdę powinniśmy już iść — upierała się pielęgniarzka Stephena. Podążając przez dziedziniec do bramy uczelni na Trinity Street, Stephen przypomniał sobie, że załatwił nam bilety na *Götterdämmerung* Wagnera wystawiany następnego wieczoru w Royal Opera House, i spytał, czy podwiozę nas do Londynu, *aby upamiętnić koniec mojej batalii z Bogiem.*

Nigdy nie wrócił do swej dawnej, oddolnej filozofii kosmologii. Coś się

w nim zmieniło tego dnia, kiedy po powrocie z Afganistanu wszedłem do jego biura. Wiele lat później, parafrazując słowa Einsteina na temat stałej kosmologicznej, Stephen powiedział mi, że oddolne podejście przyczynowe do genezy pozbawionej brzegów było jego „największym błędem”. Z perspektywy czasu widzimy, że zarówno Einstein, jak i Stephen zostali zaskoczeni własnymi teoriami. W 1917 roku obsesyjne trzymanie się przez Einsteina odwiecznej idei statycznego wszechświata sprawiło, że nie zdołał dostrzec daleko idących kosmologicznych wniosków płynących z jego klasycznej teorii względności. W podobny sposób głęboko zakorzenione myślenie przyczynowe Stephena o pochodzeniu czasu zaślepiło go na nową perspektywę, którą odsłoniła jego półklasyczna hipoteza braku brzegów.

Rozwój kosmologii odgórnej stanowił najbardziej owocną i intensywną fazę naszej współpracy. W pracy czy w pubie, na lotnisku czy przy nocnych ogniskach — filozofia odgórna stała się niewyczerpanym źródłem radości i inspiracji. W *Krótkiej historii czasu* wczesny (oddolny) Hawking napisał słynne słowa: „Nawet jeśli istnieje tylko jedna jednolita teoria, to jest ona wyłącznie zbiorem reguł i równań. Co sprawia, że równania te coś opisują, że istnieje opisywany przez nie wszechświat?”. Odpowiedź późniejszego (odgórnego) Hawkinga brzmiała: obserwowalność. Tworzymy wszechświat tak samo, jak wszechświat tworzy nas.



II. 50. Stephen Hawking i autor w połowie swej podróży, w gabinecie Stephena w nowym kampusie nauk matematycznych w Cambridge. Z tyłu na półce stoją rozprawy doktorskie naukowych wychowanków Stephena. Pod nimi, obok kuchenki mikrofalowej, leży plamisty model mikrofalowego promieniowania tła docierającego do nas ze wszystkich kierunków na niebie, tworząc okalającą nas zewsząd sferę — nasz kosmiczny horyzont.

¹ Później wpadliśmy w poważne kłopoty, próbując opuścić Uzbekistan, ponieważ wjazd przez zamknięte przejście graniczne jest nielegalny.

² Sedno rozmów przedstawionych w pierwszej części tego rozdziału ukazało się w formie opublikowanej w: Stephen W. Hawking, Thomas Hertog, *Populating the Landscape: A Top-Down Approach*, „Physical Review” D 73 (2006), s. 123527 oraz Stephen W. Hawking, *Cosmology from the Top Down*, w: *Universe or Multiverse?* red. Bernard Carr (Cambridge: Cambridge University Press, 2007), s. 91–99. Zob. również Amandy Gefter *Mr. Hawking’s flexiverse*, „New Scientist” 189, nr 2548 (22 kwietnia 2006), s. 28.

³ Kopernik obstawał za modelem heliocentrycznym ze względu na matematyczną prostotę, a nie na lepszą zgodność z obserwacjami astronomicznymi. Pierwsze wersje Kopernikańskiego modelu Układu Słonecznego zakładały kołowe orbity planet i prowadziły do niemal tych samych przewidywań dotyczących pozornych ruchów Słońca i planet co w geocentrycznym modelu Ptolemeusza. Pomysł, że planety nie poruszają się po okręgach,

lecz po elipsach, będący poważnym odejściem od sposobu myślenia obowiązującego przez tysiące lat, został przedstawiony przez Jana Keplera w 1609 roku w jego dziele *Astronomia nova*, gdzie próbował pogodzić nową teorię Kopernika z poprawionymi danymi astronomicznymi Tychona Brahe, poprzednika Keplera w Pradze. Ale nawet udoskonalenia modelu heliocentrycznego wprowadzone przez Keplera można naśladować w systemie Ptolemeusza, dodając kilka dodatkowych epicykli. Pierwsze dowody obserwacyjne zdecydowanie przemawiające za heliocentryzmem w porównaniu do starożytnego systemu ptolemeuszowskiego pojawiły się dopiero wraz z obserwacjami teleskopowymi Galileusza na początku XVII wieku. Galileusz dostrzegł, że Wenus ma takie same fazy jak Księżyc, których nie można wytłumaczyć teorią Ptolemeusza.

⁴ Starożytny grecki uczoney Archimedes z Syrakuz prowadził doświadczenia z dźwignią, aby podnosić ciężkie przedmioty. Jego eksperymenty podobno doprowadziły go do stwierdzenia: „Dajcie mi punkt podparcia, a poruszę Ziemię”.

⁵ Co do samego Kopernika, nawet jeśli był rewolucjonistą, to dość biernym. Jego książka *De revolutionibus orbium coelestium* została dostarczona drukarzom w 1543 roku, na krótko przed jego śmiercią, a jej początkowy wpływ został stłumiony. Co więcej, jakby ku pokrzepieniu swoich czytelników, Kopernik wskazał, że w jego heliocentrycznym modelu Ziemia jest „niemal” w centrum, pisząc: „Choć Ziemia nie znajduje się w samym środku świata, to jednak odległość od owego środka jest niczym w porównaniu do odległości do gwiazd stałych”.

⁶ To sformułowanie zostało użyte w zupełnie innym kontekście przez Thomasa Nagela, *The View from Nowhere* (Oxford: Clarendon Press, 1986).

⁷ Sheldon Glashow, *The Death of Science!? w: The End of Science? Attack and Defense*, Richard J. Elvee, red. (Lanham, Md.: University Press of America, 1992).

⁸ Hannah Arendt, *The Human Condition* (Chicago: University of Chicago Press, 1958).

⁹ Stephen wygłosił publicznie podobne oświadczenie mniej więcej w tym samym czasie, podczas swojego wykładu *Gödel i koniec fizyki* wygłoszonego na konferencji Strings 2002 w Cambridge w Wielkiej Brytanii.

¹⁰ Przez „powierzchnię” Stephen rozumiał trójwymiarowy wycinek czterowymiarowej czasoprzestrzeni. Ściśle mówiąc, „powierzchnia naszych obserwacji” leży wewnątrz naszego stożka świetlnego przeszłości. Jako jego przybliżenie często rozważa się trójwymiarowy wszechświat przestrzenny w danym momencie czasu.

¹¹ Tak naprawdę kongresy Solvaya odbywają się do dnia dzisiejszego i nadal cieszą się hojnym wsparciem rodziny Solvay.

¹² Otto Stern, cytowany w: Abraham Pais, „*Subtle Is the Lord*”: *The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 1982).

¹³ Albert Einstein, *Autobiographical Notes*, w: *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, red. Paul Arthur Schilpp (Evanston Ill.: Library of Living Philosophers, 1949).

¹⁴ Albert Einstein, list do Maxa Borna, 4 grudnia 1926, w: *The Born–Einstein Letters*, A.

Einstein, M. Born, H. Born (Macmillan, 1971), s. 90.

¹⁵ Cyt. w: John W.N. Sullivan, *The Limitations of Science* (New York: New American Library, 1949), s. 141.

¹⁶ Hugh Everett III, *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (rozprawa doktorska, Uniwersytet w Princeton, 1957).

¹⁷ Bruno de Finetti, *Theory of Probability*, tom 1 (New York: John Wiley and Sons, 1974).

¹⁸ John A. Wheeler, *Assessment of Everett's „Relative State” Formulation of Quantum Theory*, „Reviews of Modern Physics” 29, nr 3 (1957), s. 463–465.

¹⁹ John A. Wheeler, *Genesis and Observership*, w: *Foundational Problems in the Special Sciences*, red. Robert E. Butts i Jaakkob Hintikka (Dordrecht; Boston: D. Reidel, 1977).

²⁰ John A. Wheeler, „Frontiers of Time” w *Problems in the Foundations of Physics, Proceedings of the International School of Physics „Enrico Fermi”*, red. G. Toraldo di Francia (Amsterdam–New York: North-Holland Pub. Co., 1979), s. 1–222.

²¹ Ibidem.

²² Uważam nasz artykuł — Stephen W. Hawking, Thomas Hertog, *Populating the Landscape: A Top-Down Approach* opublikowany w „Physical Review” D 73 (2006), s. 123527 — za zakończenie pierwszego etapu rozwoju kosmologii odgórnej. Po raz pierwszy oficjalnie użyliśmy terminu „kosmologia odgórna” w publikacji: Stephen W. Hawking, Thomas Hertog, *Why does inflation start at the top of the hill?* „Physical Review” D 66 (2002), s. 123509, ale było to na długo przed spójnym wdrożeniem tego pomysłu.

²³ Kosmologia odgórna odzwierciedla w tym punkcie podejście Diraca (zob. przypis 10 w rozdziale 5) i, jak wkrótce zobaczymy, Lemaître’a.

²⁴ James B. Hartle, Stephen W. Hawking, Thomas Hertog, *The No-Boundary Measure of the Universe*, „Physical Review Letters” 100 nr 20 (2008): 201301.

²⁵ Co ciekawe, wydaje się, że Darwin niechętnie dyskutował na temat pochodzenia życia. W 1863 roku w liście do swojego przyjaciela Josepha Daltona Hookera wyraził opinię, że rozważanie pochodzenia życia jest „zwyczajnym myśleniem o bzdurach” i że „równie dobrze można się zastanawiać nad pochodzeniem materii”. Dziś oczywiście tym się właśnie zajmujemy.

²⁶ Kosmologia odgórna omija paradoksalną utratę przewidywalności multiświata, ponieważ ta teoria dzięki swoim korzeniom kwantowym przewiduje względne prawdopodobieństwo różnych fragmentów fal. Kiedy kosmologowie kwantowi twierdzą, że dwie właściwości wszechświata są ze sobą skorelowane, mają na myśli, że prawdopodobieństwo jest wysokie dla fragmentów fal, w których obie właściwości pojawiają się w wyniku ewolucji kosmologicznej. Omówiliśmy przewidywania odgórne w pracy: James B. Hartle, Stephen W. Hawking, Thomas Hertog, *Local Observation in Eternal Inflation*, „Physical Review Letters” 106 (2021), s. 141302. Pamiętam, że Stephen był wtedy wściekły, że „Physical Review Letters” kazało nam zmienić tytuł naszego artykułu. Naprawdę podobał mu się „Wieczna inflacja bez metafizyki”, tytuł przedłożonego przez nas manuskryptu, który

odzwierciedlał rosnące przekonanie Stephena, że multiświat z wieczną inflacją nie przetrwa czysto kwantowego spojrzenia na wszechświat.

²⁷ Wśród fizyków, którzy wnieśli ważny wkład w dalszy rozwój Everettowskiej mechaniki kwantowej, znajdują się Robert Griffiths i Roland Omnès, a także Erich Jos, Dieter Zeh i Wojciech Żurek.

²⁸ Mechanika kwantowa z dekoherentnymi historiami rozróżnia drobnoziarniste i gruboziarniste historie układu. Drobnoziarniste historie opisują wszystkie możliwe ścieżki układu — czy to pojedynczej cząstki, czy żywego organizmu, czy też wszechświata jako całości — śledzone w najdrobniejszych szczegółach. Jednak ten ogromny poziom szczegółowości oznacza również, że drobnoziarniste historie nie dekoherują od siebie, a zatem same w sobie nie mają większego znaczenia. W tym miejscu pojawiają się historie gruboziarniste. Historie gruboziarniste to historie drobnoziarniste, które są połączone razem, tworząc jedną (gruboziarnistą) historię. Gruboziarniste historie, które ignorują wystarczająco dużo szczegółów ewolucji układu, dekoherują od siebie i dzięki temu istnieją niezależnie, na przykład ze znaczącym prawdopodobieństwem. Ale czym są drobnoziarniste historie, które należy ze sobą połączyć? Mówiąc inaczej, jaki jest zbiór gruboziarnistych historii, które należy zachować? Decydują o tym cechy układu, które chcemy opisać lub przewidzieć. To znaczy poziom gruboziarnistości jest ściśle powiązany z pytaniami, jakie zadaje się układowi. W ten właśnie sposób mechanika kwantowa z dekoherentnymi historiami włącza obserwację w swe ramy.

²⁹ Lemaître, *Primaeval Atom Hypothesis*, op. cit.

³⁰ Charles W. Misner, Kip S. Thorne, Wojciech H. Żurek, *John Wheeler, Relativity, and Quantum Information*, „Physics Today” (kwiecień 2009), s. 40–50.

ROZDZIAŁ 7

Czas bez czasu

*Time present and time past
Are both perhaps present in time future.
And time future contained in time past.
If all time is eternally present
All time is unredeemable.*

Czas teraźniejszy i czas, który minął,
Razem obecne są chyba w przyszłości,
A przyszłość jest zawarta w czasie, który minął.
Jeżeli wszelki czas jest teraźniejszy wiecznie,
Niczym okupić nie daje się czas.

T.S. ELIOT, *BURNT NORTON*
(TŁUM. CZESŁAW MIŁOSZ)

Rozpoczęcie darwinowskiej rewolucji w kosmologii stanowiło kwintesencję działań Hawkinga. Służy jako doskonały przykład odważnego, śmiałego i opartego na intuicji uprawiania fizyki, które charakteryzowało większość jego późniejszych prac.

Nasze najwcześniejsze artykuły na temat kosmologii odgórnej pochodzą z roku 2002 i podczas gdy z perspektywy czasu znaleźliśmy się na właściwej ścieżce, naprawdę poruszaliśmy się po ruchomych piaskach. Nawet na późniejszych etapach superpozycja możliwych historii wszechświata, która leży u podstaw filozofii odgórnej, pozostawała trudna do rozgryzienia. Czy te historie połączyły się, tworząc ogromne rozszerzenie funkcji falowej wszechświata Everetta, coś w rodzaju kwantowej wersji multiświata z mackami rozciągającymi się we wszystkie zakątki krajobrazu strun? Jeśli jednak tak się stało, to czy ta wielka funkcja falowa kosmosu nie może być

długo poszukiwanym metaprawem leżącym u podstaw całej teorii fizycznej, ponownie sprowadzającą obserwację zaledwie do czegoś na kształt efektu postselekcji?

Nasze wczesne koncepcje odgórne zostały kiedyś nazwane przez Jima Hartle'a „pomysłami na pomysł” — spostrzeżeniami, które prawdopodobnie okazały się głębokie i ważne, ale wymagały osadzenia w ramach odpowiedniej teorii fizycznej, aby wydać owoce. Zaczęliśmy więc szukać pewniejszego gruntu.

Inspiracja nadeszła z nieoczekiwanej strony. Mniej więcej w tym czasie rozpoczęła się druga rewolucja strunowa w fizyce. Powstawała przy biurkach i na tablicach gabinetów teoretyków strun, którzy eksperymentując z hipotetycznymi wszechświatami, odkryli, że mają one dziwne właściwości **h o l o g r a f i c z n e**.

Po raz pierwszy usłyszałem o holograficznej rewolucji w fizyce teoretycznej w styczniu 1998 roku. Jako świeżo upieczony absolwent uczęszczałem na zaawansowany kurs matematyki w DAMTP, znany w żargonie Cambridge pod nazwą „Część III”, kiedy to na początku drugiego trymestru na wydziale zorganizowano specjalny cykl seminariów badawczych, będący ponoć pokłosiem ważnych nowych osiągnięć, które, jak głosiły plotki, „wszystko zmieniają”.

Brzmiało to arcyciekawie, więc postanowiłem wślizgnąć się do sali seminaryjnej, aby posłuchać pierwszego wykładu. Odbywał się jeszcze w starym budynku DAMTP przy Silver Street w centrum Cambridge, w słabo oświetlonej sali wykładowej z zamglonymi oknami i wielką tablicą biegnącą przez całą długość ściany. Salę wypełniała niemal setka fizyków teoretycznych, a atmosfera była głośna i nieformalna. Niektórzy prowadzili żywiołowe dyskusje, inni gorączkowo zapisywali równania, a jeszcze inni po prostu się relaksowali, sącząc herbatę.

Szukałem miejsca, z którego mógłbym to wszystko ogarnąć, kiedy mój wzrok przykuł prelegent. Widziałem go już wcześniej — Stephen jeżdżący na

wózku inwalidzkim był przecież znanym widokiem w Cambridge. Ale spotkanie go tutaj, w jego naukowym mateczniku, ujawniło całkowicie nowy wymiar jego osobowości. Mimo że pozostawał niemal unieruchomiony, był pełen życia. Wyraźnie uwielbiany przez kolegów i będąc w epicentrum swojej grupy zajmującej się grawitacją, uśmiechał się i wchodził w relacje z otaczającymi go ludźmi na różne subtelne sposoby, których nie mogłem rozszyfrować. Cała ta scena emanowała zażyłością i czystą radością. Miałem wrażenie, jakbym się znalazł na rodzinnym przyjęciu. W menu podawano: koniec znanej nam czasoprzestrzeni.

Stephen manewrował swoim wózkiem inwalidzkim, z lewą ręką na drążku sterującym na podłokietniku fotela, najwyraźniej usiłując ustawić się tak, aby mógł widzieć zarówno publiczność, unosząc oczy i kierując je lekko w prawo, jak i projektor ekranu, podnosząc wzrok i kierując lekko w lewo. Kiedy w końcu udało mu się osiągnąć właściwą pozycję, Gary Gibbons wstał i powiedział publiczności, że Stephen wygłosi pierwszy wykład w ramach wspólnie przygotowanego przez nich specjalnego cyklu, po czym w sali zaległa cisza. Trzymając pilota w prawej ręce, Stephen zaczął wykonywać serię operacji, aby wyświetlić tekst, który miał się pojawić na ekranie jego wózka inwalidzkiego. Potem przerwał, spojrzał na nas, popatrzył znów na ekran i kliknął raz jeszcze: *Zawsze miałem słabość do przestrzeni anty-de Sittera i czułem, że jest ona niesłusznie zaniedbywana. Cieszę się więc, że wróciła do łaski z taką mocą.*

Stephen czytał swój wykład, przesyłając przygotowany tekst zdanie po zdaniu do komputerowego syntezatora mowy przymocowanego do jego fotela. W pierwszym rzędzie siedział asystent z wydrukiem tego tekstu na kolanach. Obsługiwał projektor, aby wyświetlić kilka slajdów z podstawowymi ilustracjami przestrzeni anty-de Sittera i innych kształtów przestrzeni przedstawionych w wykładzie Stephena. Czasami Stephen robił przerwę, by nawiązać kontakt wzrokowy z publicznością, oceniając naszą reakcję na

dowcip, z którego był dumny, lub pozwalając wybrzmieć kontrowersyjnemu stwierdzeniu.

Byłem zahipnotyzowany występem Stephena, ale też tą dziwną przestrzenią anty-de Sittera, która stanowiła źródło tak wielu emocji. Nie przypuszczałem, że ledwie rok później Stephen zasugeruje innemu swojemu studentowi, Harveyowi Reallowi, oraz mnie, abyśmy zastanowili się nad holograficznym wszechświatem, w którym nasz widzialny wszechświat jest czterowymiarową membraną w pięciowymiarowej przestrzeni anty-de Sittera. Potem razem napiszemy artykuł pod tytułem *Brane New World*¹. Spopularyzowana wersja tej publikacji trafiła do książki *Wszechświat w skorupce orzecha*, którą wówczas redagowaliśmy. Sposób, w jaki Stephen niemal jednocześnie wplatał swoje specjalistyczne badania w treść swoich książek, był imponujący, niemal niespotykany w naukach ścisłych².

Tak naprawdę pomyśl, że wszechświat może być podobny do hologramu, ma długą historię. Być może pamiętacie alegorię jaskini platońskiej, w której Platon porównuje nasze postrzeganie świata do sytuacji więźniów zamkniętych w jaskini i obserwujących cienie na ścianach. Platon wyobrażał sobie nasz świat pozorów jako słaby przebłysk znacznie szerszej rzeczywistości doskonałych form matematycznych, które gdzieś tam istnieją zupełnie niezależnie od nas. Dziś holograficzna rewolucja w fizyce stawia na głowie wizję Platona. Jej współczesne wcielenie zakłada, że wszystko w doświadczanych przez nas czterech wymiarach jest w rzeczywistości przejawem ukrytej rzeczywistości zlokalizowanej na cienkiej warstwie czasoprzestrzeni. Holografia utrzymuje, że istnieje alternatywny opis rzeczywistości, zupełnie inny sposób patrzenia na świat, z którego wyłania się grawitacja i zakrzywiona czasoprzestrzeń. Co więcej, według niej trójwymiarowy świat cieni cząstek i pól kwantowych może mimo wszystko stanowić pełny opis. W swej najbardziej ambitnej formie holografia XXI wieku potwierdza, że gdybyśmy tylko mogli odkodować ten ukryty hologram, zrozumielibyśmy najgłębszą naturę fizycznej rzeczywistości.

Teoretyczne odkrycie holografii należy do najdonioślejszych odkryć w fizyce końca XX wieku. Wywarło również bezpośredni wpływ na myślenie Stephena, wciągając go głębiej w teorię strun. I chociaż fizycy nadal nie doszli do porozumienia, gdzie dokładnie miałyby się znajdować ten hologram ani z czego byłby zrobiony, ujawniona przez holografię nowa perspektywa zmieniła już fizykę teoretyczną w radykalny sposób. Przez dziesięciolecia fizycy teoretyczni usiłowali dokończyć rozpoczętą przez teorię strun unifikację ogólnej teorii względności z teorią kwantową. Odkrycie holografii właśnie temu służy. Według niej grawitacja i teoria kwantowa nie muszą być wodą i ogniem, ale mogą przypominać *yin* i *yang*, dwa bardzo różne, choć uzupełniające się opisy jednej i tej samej rzeczywistości fizycznej.

Chociaż holografia nie została wynaleziona z myślą o realistycznym wszechświecie, kosmologia może być areną, na którą ostatecznie będzie miała najbardziej radykalny wpływ. Holografia zapewniła poszukiwany przeze mnie i Stephena sposób osadzenia kosmologii odgórnej na mocniejszym gruncie. I jak opiszę w tym rozdziale, sprawia, że pełnoskalowe podejście odgórne do odkrycia prawdy o Wielkim Wybuchu jest w istocie nieuniknione.

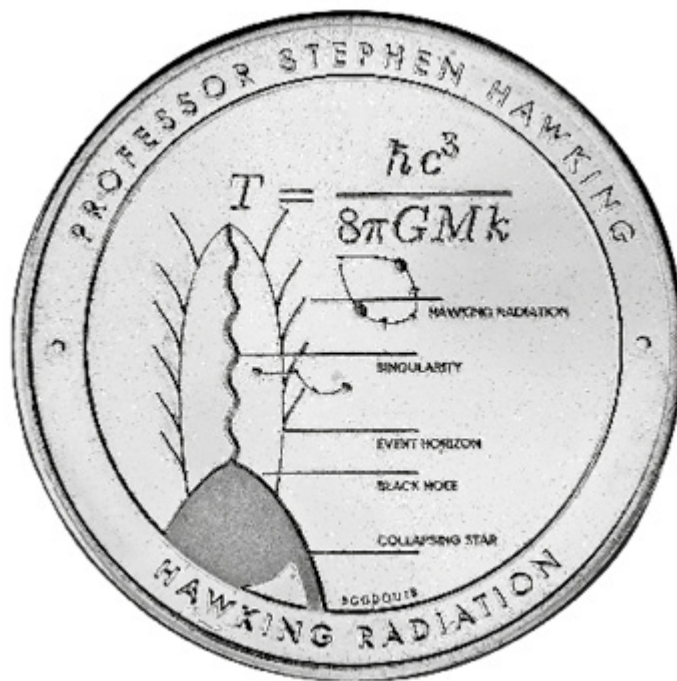
Opracowanie holograficznej kosmologii odgórnej oznaczało trzeci etap naszej podróży. Rozpoczęliśmy go podczas jednej z wizyt Stephena w Belgii jesienią 2011 roku i ostatecznie znalazł swą kulminację w artykule, który opublikowaliśmy na krótko przed jego śmiercią³. Jest to przede wszystkim podróż w głąb najnowocześniejszej fizyki teoretycznej, łącząca odległe dziedziny, od informacji kwantowej po czarne dziury i kosmologię, w ramach kuszącej syntezy, która sugeruje, że może istnieć „czas bez czasu”.

Pierwsze wskazówki dotyczące holografii sięgają złotego wieku badań nad czarnymi dziurami na początku lat siedemdziesiątych, kiedy fizycy teoretyczni ostatecznie zrozumieli podstawowe właściwości tych niewiarygodnie gęstych obiektów.

Kulminacją złotego wieku było zaskakujące odkrycie Hawkinga, że czarne

dziury nie są całkowicie czarne, ale emitują słabą poświatę promieniowania. Z początku Stephen uważał, że popełnił błąd w swoich obliczeniach. Czarne dziury miały pochłaniać całą materię i promieniowanie, a nie emitować — w końcu to przecież jest istotą czarnej dziury. Do poprawności jego obliczeń i realności tego promieniowania przekonało go to, że ma ono wszystkie właściwości tak zwanego **ciepłego promieniowania ciała doskonale czarnego**, którym fizycy nazywają rodzaj promieniowania emitowanego przez zwykły nieodbijający światła obiekt w danej temperaturze. Przykładem promieniowania ciała doskonale czarnego jest kosmiczne mikrofalowe promieniowanie tła o temperaturze 2,7 kelwina. Mówi nam, że cały obserwowalny wszechświat zachowuje się jak zwykłe ciało promieniujące.

Teoretyczne wyprowadzenie w 1900 roku przez Plancka widma promieniowania ciała doskonale czarnego stanowiło początek rewolucji kwantowej. Dzisiaj, za każdym razem, kiedy widmo Plancka pojawia się w przyrodzie, fizycy traktują je jako charakterystyczną oznakę działającego u podstaw procesu kwantowego. Taki właśnie proces rozważał Hawking. Stephen traktował czarne dziury z półklasycznej perspektywy, badając kwantowe zachowanie materii poruszającej się w klasycznej zakrzywionej geometrii czarnej dziury. Ku swemu zaskoczeniu odkrył, że procesy kwantowe w pobliżu powierzchni horyzontu, czyli punktu bez powrotu w teorii względności, powodują powstanie niewielkiego strumienia promieniowania ciepłego rozchodzącego się z czarnej dziury we wszystkich kierunkach. Następnie obliczył temperaturę T czarnej dziury, otrzymując wzór pokazany na medalu na ilustracji 51.



II. 51. Wzór Stephena na temperaturę czarnej dziury, wraz z opisem procesu promieniowania Hawkinga, pojawia się na medalionach wybitych z okazji umieszczenia jego prochów w opactwie westminsterskim 15 czerwca 2018 roku.

Litera M w tym wzorze oznacza masę czarnej dziury. Pozostałe wielkości to wszystkie podstawowe stałe natury: c to prędkość światła, G to stała grawitacji Newtona, \hbar to kwantowa stała Plancka, a k to stała Boltzmanna pochodząca z termodynamiki — nauki o energii, ciepłe i pracy. Czyste piękno wzoru Hawkinga polega na tym, że łączy wszystkie te stałe w jednym równaniu. W przeciwieństwie do innych słynnych równań fizyki XX wieku — takich jak równanie Einsteina czy Schrödingera, które opisują odrębne dziedziny fizyki — wzór Hawkinga stanowi pomost dla różnych obszarów. Łącząc zasady teorii kwantowej i ogólnej teorii względności, Hawking podjął matematyczne ryzyko, ale w nagrodę otrzymał wniosek, do którego ani teoria względności, ani teoria kwantowa nigdy by samodzielnie nie doprowadziły: czarne dziury promieniują. Wheeler powiedział kiedyś o wzorze Hawkinga, że samo mówienie o nim przypominało „zabawę cukierkiem w ustach”. Dziś

wzór na temperaturę czarnej dziury jest wyryty na nagrobku Stephena w opactwie westminsterskim, niczym jego przepustka do nieśmiertelności⁴.

Odkrycie Stephena spadło jak grom z jasnego nieba. Ogłosił swój wynik w lutym 1974 roku podczas spotkania dotyczącego grawitacji kwantowej w laboratoriach Rutherford Appleton w pobliżu Oksfordu. Oświadczył, że „czarne dziury są rozgrzane do białości”, wprowadzając publiczność w osłupienie. Z pewnością była to charakterystyczna dla Hawkinga przesada. Dla czarnych dziur będących pozostałościami po gwiazdach liczby w jego wzorze dają temperaturę poniżej 0,000001 kelwina, znacznie niższą nawet niż przeraźliwie zimne promieniowanie CMB o temperaturze 2,7 kelwina. Zatem prawdopodobnie nigdy nie zaobserwujemy promieniowania czarnych dziur. Ale to tylko praktyczna niedogodność. Promieniowanie Hawkinga ma rewolucyjne znaczenie z samych tylko powodów teoretycznych, ponieważ wywraca do góry nogami klasyczny obraz czarnych dziur jako pustych, bezdennych czeluści w czasoprzestrzeni, z których nic nie może uciec.

Rewolucja wynika stąd, że promieniowanie cieplne zwykle jest wywołane ruchem wewnętrznych składników obiektu. To dlatego temperatura idzie w parze z entropią, wprowadzoną przez Boltzmann'a miarą określającą liczbę mikroskopowych rozmieszczeń składników układu pozostawiających niezmienną jego właściwości makroskopowe. Z kolei entropia jest ściśle powiązana z informacją, czyli koncepcją, że każda cząstka i każda siła we wszechświecie niesie w sobie domyślną odpowiedź na pytanie „tak-lub-nie”. Ogólnie mówiąc, wyższa entropia oznacza, że więcej informacji można przechowywać w mikroskopijnych szczegółach układu bez zmiany jego ogólnych właściwości makroskopowych. Ze swojego wzoru na temperaturę czarnych dziur Hawking mógł natychmiast wyprowadzić wzór na wartość ich entropii S . Oto on:

$$S = \frac{kc^3A}{4G\hbar}$$

W istocie Hawking nie był pierwszym, który przedstawił tezę, że czarne dziury mają entropię. Już w 1972 izraelsko-amerykański fizyk Jacob Bekenstein wysunął koncepcję, że czarna dziura ma entropię proporcjonalną do powierzchni A swojego horyzontu. W tym czasie prawie cała społeczność naukowa — ze Stephenem na czele! — odrzuciła pomysł Bekensteina, ponieważ, no cóż, przecież czarne dziury nie promieniują, a zatem nie mogą mieć entropii. Swym odkryciem promieniowania Hawkinga Stephen mimowolnie udowodnił, że Bekenstein miał rację.

Wzór na entropię Bekensteina i Hawkinga przewiduje, że czarne dziury mają naprawdę gigantyczną zdolność do przechowywania informacji. Czarne dziury to prawdopodobnie najbardziej wydajne kosmiczne urządzenia pamięci masowej we wszechświecie. Zgodnie z powyższym wzorem Sagittarius A*, ogromna czarna dziura o masie czterech milionów mas Słońca, czająca się w centrum Drogi Mlecznej — której cień po raz pierwszy sfotografowano wiosną 2022 roku — może pomieścić co najmniej 10^{80} gigabajtów danych. Natomiast wszystkie dane w bankach pamięci Google'a mogą z łatwością zmieścić się w czarnej dziurze mniejszej od protonu. (Oczywiście po wprowadzeniu informacje te byłyby bardzo trudne do wyguglowania!) Niemniej, niezależnie od tego, jak duża może być entropia, wzór wyraźnie pokazuje, że liczba bitów wewnątrz czarnej dziury jest skończona. Najbardziej bezpośrednią interpretacją wzoru na entropię jest to, że istnieje ogromna, ale skończona liczba czarnych dziur, które wyglądają tak samo z zewnątrz, lecz mimo to różnią się składem wewnętrznym.

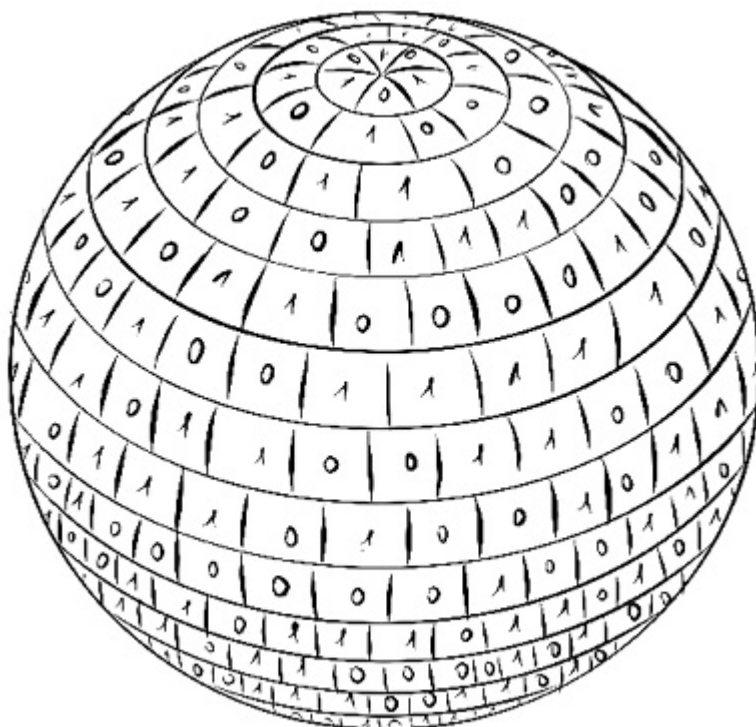
To intrygujące. Zgodnie z klasyczną ogólną teorią względności czarne dziury są uosobieniem prostoty. Relatywistyczne czarne dziury przybierają najbardziej enigmatyczną twarz pokerzysty. Teoria Einsteina mówi, że nie ma znaczenia, czy czarna dziura jest zbudowana z gwiazd, diamentu czy nawet z antymaterii. Ostatecznie charakteryzuje się tylko dwiema liczbami: całkowitą masą i momentem pędu. Wheeler podsumował tę skrajną prostotę słynnym stwierdzeniem: „Czarne dziury nie mają włosów”, przekazując tym

samym ideę, że czarne dziury najwyraźniej nie mają żadnej pamięci o swojej historii powstawania. Czarne dziury w ogólnej teorii względności są najdoskonalszymi śmietnikami z wewnętrzną osobliwością, która ma nieskończoną zdolność pochłaniania i niszczenia wszystkich wpadających do niej informacji.

Jednak półklasyczny wzór na entropię Bekensteina i Hawkinga maluje zupełnie inny obraz. Przedstawia czarne dziury jako najbardziej skomplikowane obiekty w przyrodzie będące dokładnym przeciwieństwem ich klasycznego obrazu. Wzór na entropię sugeruje, że ogólna teoria względności Einsteina, ponieważ ignoruje mechanikę kwantową i zasadę nieoznaczoności, całkowicie pomija ogromną liczbę gigabajtów zakodowanych w wewnętrznej mikrostrukturze czarnej dziury.

Fakt, że entropia rośnie proporcjonalnie do powierzchni A , a nie do objętości czarnej dziury, jest w tym kontekście jeszcze bardziej zaskakujący. Pojemność informacyjna wszystkich znanych układów jest związana z ich wewnętrzną objętością, a nie z wielkością ich zewnętrznej powierzchni. Chcąc na przykład oszacować ilość informacji w bibliotece, lepiej policzyć książki na wszystkich półkach, a nie tylko na jej ścianach. Najwyraźniej nie dotyczy to czarnych dziur. Aby obliczyć zawartość informacji kwantowej czarnej dziury, wzór na entropię każe nam rozważyć powierzchnię horyzontu A i pokryć ją siatką maleńkich komórek, których boki mierzą jedną długość Plancka (zob. il. 52). Długość Plancka l_p to w zasadzie jeden kwant długości. Jest to najmniejsza skala, dla której pojęcie odległości ma jakiegokolwiek znaczenie. Wyrażona w kategoriach powyższych stałych natury, powierzchnia pojedynczej komórki Plancka to $l_p^2 = G\hbar/c^3$ i wynosi około 10^{-66} cm². Mierząc powierzchnię horyzontu w kwantach komórek Plancka, wzór na entropię przewiduje, że całkowita zawartość informacyjna czarnej dziury to liczba takich komórek potrzebnych do pokrycia całego horyzontu podzielona przez cztery. Tak więc epokowy wniosek płynący z równania entropii polega na tym, że każda komórka Plancka na horyzoncie zawiera jeden bit informacji.

Każdy z tych bitów może potencjalnie dostarczyć odpowiedzi na jedno pytanie „tak-lub-nie” dotyczące ewolucji oraz mikrostruktury czarnej dziury, a zbiór tych bitów to wszystko, co trzeba wiedzieć o czarnej dziurze.



II. 52. Entropia czarnej dziury jest równa liczbie komórek Plancka potrzebnych do pokrycia powierzchni jej horyzontu podzielonej przez cztery. To tak, jakby każda taka maleńka komórka zawierała jeden bit informacji, a ich całość to wszystko, co można wiedzieć o czarnej dziurze.

Był to pierwszy przebłysk holografii we współczesnej fizyce: pojemność czarnej dziury nie zależy od jej wewnętrznej objętości, lecz od powierzchni jej horyzontu. To tak, jakby czarne dziury nie miały wnętrza, ale były **h o l o g r a m a m i**.

Jak mamy to wszystko rozumieć? Wzór na entropię nie mówi, w jaki sposób czarne dziury przechowują swoje zetabajty, ani nawet czy ich kwantowe elementy naprawdę znajdują się na niezbadanej powierzchni horyzontu. Entropia nie określa również listy pytań typu „tak-lub-nie”, na które rzekomo

udzielają odpowiedzi zawarte w niej bity informacji. Wskazuje jedynie, że te bity powinny istnieć.

Sytuacja staje się jeszcze bardziej zagmatwana, gdy wyobrazimy sobie, co może się stać z ukrytymi informacjami, gdy czarna dziura się starzeje. Masa czarnej dziury M występuje w mianowniku we wzorze na temperaturę. Jeśli więc czarna dziura traci masę, powoli wypromieniowując energię i cząstki, jej temperatura wzrasta, przez co świeci jaśniej i traci masę w jeszcze szybszym tempie. Stąd promieniowanie Hawkinga, nawet jeśli rozpoczyna się niewyobrażalnie powoli, jest samowzmacniającym się procesem, który ostatecznie powoduje znikanie czarnych dziur. Nie uszło to uwagi Hawkinga⁵. „Czarne dziury nie są wieczne” — pisał. „Parują w coraz szybszym tempie, aż znikną w gigantycznej eksplozji”.

Jaki zatem los czeka ogromną ilość informacji przechowywanej w jej wnętrzu, gdy czarne dziury promieniają i ostatecznie wyparują?

Wydaje się, że istnieją dwa rozsądne scenariusze. Po pierwsze, informacje giną na zawsze. Czarne dziury to najlepsze gumki do ścierania. Biorąc pod uwagę zdolność pochłaniania czarnych dziur, może się to wydawać naturalnym wnioskiem. Ale problem polega na tym, że teoria kwantowa zabrania takiego scenariusza. Podstawowe zasady teorii kwantowej zakładają, że funkcja falowa dowolnego układu ewoluuje w sposób zachowujący informację. Zawsze. Ewolucja kwantowa potrafi przetworzyć informacje w sposób nie do poznania, ale nigdy nie może nieodwracalnie ich usunąć. Ta właściwość jest ściśle związana z oczywistym wymogiem, zgodnie z którym prawdopodobieństwa w teorii kwantowej muszą zawsze sumować się do jedności. To zachowanie informacji oznacza na przykład, że kiedy spalimy encyklopedię, prawa fizyki kwantowej przewidują, iż możemy w teorii odzyskać wszystkie informacje z jej popiołów. Podobnie, jeśli mechanika kwantowa obowiązuje blisko powierzchni horyzontu czarnych dziur — a nie mamy żadnego powodu, by w to wątpić — wtedy każdy strzępek informacji musi ostatecznie zostać odzyskany, kiedy czarna dziura zniknie.

Rozważmy drugi scenariusz. Być może wszystkie informacje wyciekają zakodowane w promieniowaniu Hawkinga? Ponieważ proces parowania trwa przez eony, wydaje się to możliwe. Co więcej, byłoby to w pełni zgodne z mechaniką kwantową. Niestety, obliczenia Stephena mówią nam coś zupełnie innego. Promieniowanie Hawkinga nie niesie żadnych informacji. Kiedy czarna dziura emituje część swojej masy w postaci promieniowania Hawkinga, jego widmo jest niemal całkowicie pozbawione jakichkolwiek cech charakterystycznych. To promieniowanie nie ujawnia żadnych mikroskopowych właściwości czarnej dziury ani jej historii. Kiedy czarna dziura wypromieniuje swoją ostatnią porcję masy i zniknie, według Hawkinga pozostanie tylko chmura przypadkowego promieniowania cieplnego, z którego nie można nawet teoretycznie dowiedzieć się o istnieniu jakiegokolwiek czarnej dziury — nie mówiąc już o tej konkretnej. Hawking ogłosił, że parujące czarne dziury zasadniczo różnią się od płonących encyklopedii.

Jest to paradoks. Informacje wydają się bezpowrotnie tracone, gdy czarne dziury wyparowują, ale teoria kwantowa mówi, że jest to niemożliwe. Stopniowo fizycy uświadomili sobie, że Stephen w swoim genialnym eksperymencie myślowym dotknął nadzwyczaj głębokiego i trudnego problemu, który pojawia się, gdy teoria względności i teoria kwantowa zapuszczają się w te same rejony. Opierając się na pozornie idealnym, półklasycznym połączeniu obu teorii⁶, wykazał, że przepaść dzieląca obie teorie jest w rzeczywistości znacznie głębsza i szersza, niż on czy ktokolwiek inny się spodziewał. Paradoks losu informacji ukrytych wewnątrz parujących czarnych dziur stał się najbardziej nurtującą zagadką fizyki teoretycznej końca XX wieku, nękając dwa pokolenia fizyków. Pod pewnymi względami stanowi współczesny odpowiednik anomalii Merkurego z XIX wieku, ruchu peryhelium orbity tej planety, który przeczył teorii Newtona. Paradoks informacyjny czarnej dziury stał się drogowskazem w poszukiwaniach ujednoczonej teorii. Fizycy uważali, że gdyby mogli rozplątać węzeł Hawkinga i zrozumieć, co się dzieje z ukrytą informacją, gdy czarne dziury

przestają istnieć, byłoby na dobrej drodze do połączenia zasad teorii względności i teorii kwantowej w pojedynczą spójną strukturę.

Początkowo Stephen postawił na pierwszy scenariusz: informacje są tracone; fizyka jest w poważnych tarapatkach; teoria kwantowa musi zostać skorygowana. *Załamanie przewidywalności w kolapsie grawitacyjnym* to tytuł artykułu, w którym po raz pierwszy omówił konsekwencje utraty informacji.

Oczywiście czarna dziura o masie Słońca zacznie emitować promieniowanie Hawkinga dopiero za kilkaset miliardów lat, kiedy temperatura mikrofalowego promieniowania tła w końcu spadnie poniżej temperatury gwiazdowych czarnych dziur. Sam proces parowania potrwa co najmniej kolejne 10^{60} lat, znacznie dłużej niż obecny wiek wszechświata. Tak więc, o ile gorący Wielki Wybuch nie wytworzył czarnych minidziur lub jeśli Wielki Zderzacz Hadronów w CERN nie będzie jednak w stanie pewnego dnia tego dokonać, eksplozje czarnych dziur najprawdopodobniej pozostaną teoretycznym eksperymentem myślowym przez dłuższy czas.

Ale eksperyment Stephena był kwestią zasad. Jeśli czarne dziury rzeczywiście niszczą informacje, to mogą emitować dowolny zbiór cząstek, kiedy w końcu zaczną parować. To by oznaczało, że cykl życia czarnych dziur — od kolapsu grawitacyjnego gwiazdy do chmury promieniowania Hawkinga — mógłby obdarzyć fizykę zupełnie nową warstwą losowości i nieprzewidywalności poza zwykłym prawdopodobieństwem mechaniki kwantowej. Wyglądałoby to tak, jakby część funkcji falowej zapadającej się gwiazdy po prostu zniknęła w czarnej dziurze, być może wyciekając do innego wszechświata. Ale zagroziłoby to zdolności fizyki do przewidywania przyszłości **n a s z e g o w s z e c h ś w i a t a** nawet w ograniczonym probabilistycznym rozumieniu znanym z mechaniki kwantowej. A jeśli determinizm, podstawowa przewidywalność wszechświata oparta na prawach naukowych, miałby się załamać w obecności czarnych dziur, skąd możemy mieć pewność, że nie załame się w innych sytuacjach? Jak moglibyśmy być

pewni naszej własnej historii i naszych wspomnień? „To przeszłość mówi nam, kim jesteśmy” — słusznie zauważył Stephen⁷. „Bez niej tracimy naszą tożsamość”. Rozważając dalekosiężne konsekwencje utraty informacji wewnątrz czarnych dziur, Stephen doszedł do wniosku, że fizyka rzeczywiście znalazła się w poważnych tarapatach.

Przez lata toczył się jałowy spór bez większych postępów. Ci, którzy podeszli do problemu z punktu widzenia fizyki cząstek elementarnych, twierdzili, że teoria kwantowa jest poprawna, a Stephen popełnił błąd. Jednak żaden fizyk cząstek nie mógł znaleźć pomyłki w obliczeniach Stephena. Zarazem jednak większość relatywistów — w pełni świadomych niszczycielskiej siły osobliwości czasoprzestrzennych — opowiedziała się po stronie Stephena, ale nie udało się im wymyślić przekonującej strategii ratowania fizyki. W rezultacie powstała inspirująca atmosfera naukowa, która połączyła obie grupy badawcze. Fizycy cząstek i relatywiści, stosując różne metody i narzędzia, zaczęli się od siebie uczyć, zjednoczeni w poszukiwaniu głębszej prawdy ukrytej w słabych fotonach sprawiających, że czarne dziury świecą.

Jednak dopiero na początku XXI wieku, kiedy fizycy wreszcie lepiej zrozumieli holograficzną naturę czarnych dziur, cały nowy wachlarz pomysłów i eksperymentów myślowych przełamał impas paradoksu czarnych dziur. Te spostrzeżenia wynikały z tak zwanej drugiej rewolucji strunowej — teorii, która pod koniec lat dziewięćdziesiątych nadała impuls kosmologii multiświata i odegrała kluczową rolę w wysiłkach fizyków zmierzających do sformułowania zunifikowanej kwantowej teorii grawitacji i wszystkich innych sił (zob. rozdział 5).

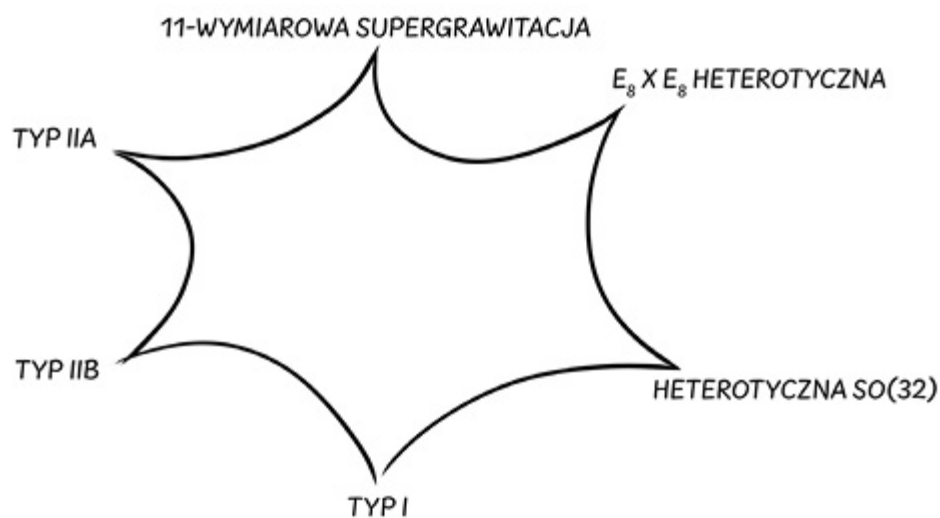
Wybitny teoretyk strun Edward Witten z Instytutu Studiów Zaawansowanych w Princeton oddał pierwszą salwę drugiej rewolucji strunowej, wygłaszając wykład na konferencji Strings '95, dorocznym zgromadzeniu teoretyków strun z całego świata.

Trzeba przyznać, że teoria strun nie była w owym czasie w najlepszej formie. Perspektywy sytuacji, że fizycy kiedykolwiek będą w stanie przetestować którąkolwiek z kluczowych idei tej teorii, wydawały się (delikatnie mówiąc) słabe. Zderzenia cząstek o najwyższych energiach w największych akceleratorach świata nie ujawniły do dziś żadnych śladów, że istnieją zwinięte dodatkowe wymiary, do których przepływa część energii uwolnionej w zderzeniach. Niezwykle mała skala Plancka, przy której kwantowa natura grawitacji na pewno dałaby o sobie znać, wydawała się całkowicie poza zasięgiem, ponieważ do zbadania tak małej skali potrzebny byłby akcelerator cząstek wielkości Drogi Mlecznej. Co więcej, pomimo wielu lat stosowania nowatorskich metod matematycznych teoria ta nie rzuciła światła na kwantową naturę grawitacji w sytuacjach, w których rzeczywiście powinna — wewnątrz czarnych dziur i podczas Wielkiego Wybuchu. Co gorsza, teoretycy strun zdali sobie sprawę, że nie istnieje jedna teoria, lecz pięć różnych jej wariantów, z których wszystkie w równym stopniu pretendowały do miana „prawdziwej” zunifikowanej teorii przyrody. Do tego dochodziła heretycka szósta teoria, zwana supergrawitacją, będąca rozszerzeniem teorii względności Einsteina, która uwzględniała materię i supersymetrię i zawierała obiekty przypominające membrany, a nie struny. W istocie, jako centrum badań nad supergrawitacją Cambridge zyskało w tym okresie antystrunową reputację.

Kilka uwag na temat dynamiki strun, tytuł wykładu Wittena podczas konferencji Strings '95, nie sugerował, że miał on przełamać impas. Ale tak się właśnie stało. W tym legendarnym wykładzie, który zapisał się na stałe w annałach fizyki, Witten naszkicował radykalnie nowe spojrzenie na teorię strun. Twierdził, że pięć teorii strun i dysydencka teoria supergrawitacji nie były sześcioma oddzielnymi teoriami, lecz jedynie odmiennymi obliczami jednego gmachu matematycznego. Łącząc szeroki wachlarz spostrzeżeń, Witten określił wymyślny zbiór relacji matematycznych, które przekształcają różne teorie strun w siebie i w supergrawitację, tworząc strukturę

przypominającą sieć, wiążącą je wszystkie ze sobą (zob. il. 53). Nazwał tę sieć **M - t e o r i ą**. I nawet jeśli M-teoria sama w sobie może nie mieć określonej struktury — niektórzy twierdzą, że M oznacza magię lub metafizykę — ma niesamowitą zdolność zmiany kształtu, dzięki czemu przybiera postać jednej z sześciu teorii partnerskich w zależności od perspektywy. To głębsze połączenie, które ujawniła M-teoria, wystarczyło do wywołania drugiej rewolucji strunowej. M-teoria uświadomiła teoretykom, że ich sześć odmiennych podejść do zunifikowanej teorii nie było ze sobą w konflikcie, lecz stanowiło uzupełniające się drogi prowadzące do grawitacji kwantowej, które mogły wzmacniać się nawzajem⁸.

Relacje matematyczne, które przekształcają w siebie pozornie odrębne teorie, fizycy nazywają **d u a l n o ś c i a m i**. Dwie dualne teorie są w pewien sposób równoważne — opisują jedną i tę samą sytuację fizyczną wyrażoną w różnych językach matematycznych. Prosty przykładem jest dualizm korpuskularno-falowy w mechanice kwantowej, który spowodował wiele zamieszania we wczesnej fazie rozwoju tej teorii.



Il. 53. Sieć matematycznych zależności łączy ze sobą pięć teorii strun i teorię supergrawitacji, wskazując na głębszą unifikującą strukturę.

Dualności w fizyce to potężna broń obliczeniowa, gdyż dzięki uzupełniającym się spojrzeniom na dany układ fizyczny mogą wieść ku

nowym perspektywom. Dualności M-teorii są szczególnie użyteczne, ponieważ mogą przekształcić skomplikowaną analizę w jednej teorii strun w prosty problem w jej dualnym partnerze. Przed drugą rewolucją strunową fizycy musieli się opierać na przybliżonych metodach, osobno analizując każdą z teorii strun. Ograniczało to pole działania głównie do sytuacji półklasycznych, w których stosunkowo niewielka liczba strun drgała w słabo zakrzywionej, klasycznej przestrzeni tła. W rezultacie fascynujące właściwości kwantowe czarnych dziur, nie mówiąc już o Wielkim Wybuchu, pozostały w dużej mierze poza zasięgiem analiz, a wielki projekt unifikacji utknął w martwym punkcie. Druga rewolucja strunowa radykalnie zmieniła tę sytuację. Odtąd, gdy w jednej teorii strun pojawiają się problemy, dualność często przychodzi z pomocą, przekształcając nieprawdopodobnie skomplikowane obliczenia na w pełni wykonalne w innej teorii strun. Tak więc sieć M-teorii Wittena jest czymś znacznie szerszym niż tylko sumą swych teorii składowych. Łącząc ze sobą wnioski płynące ze wszystkich pięciu teorii strun i supergravitacji, M-teoria wkroczyła na zupełnie niezbadane terytoria w kwantowym królestwie gravitacji i unifikacji.

Jednak zwieńczeniem drugiej rewolucji strunowej było odkrycie całkowicie nowego rodzaju dualności tak dziwnej, że nikt nie spodziewał się jej istnienia — **dualności holograficznej**.

W 1997 roku urodzony w Argentynie Juan Maldacena, pracujący jako młody adiunkt na Uniwersytecie Harvarda, odkrył intrygującą dualność, która nie łączy dwóch teorii strun ani dwóch teorii cząstek. Zamiast tego wiąże teorie strun obejmujące gravitację z teoriami cząstek pozbawionych gravitacji. Co więcej, obie strony dualności Maldaceny istnieją w różnej liczbie wymiarów: teoria cząstek jest jak hologram teorii gravitacji.

Maldacena odkrył tę niezwykłą dualność, rozważając teorię strun i supergravitację w szczególnym hipotetycznym otoczeniu⁹. Gravitacyjna strona dualności Maldaceny obejmuje ogólną teorię względności

i supergrawitację we wszechświatach o kształcie podobnym do przestrzeni anty-de Sittera, czyli przestrzeni AdS. Jak sama nazwa wskazuje, przestrzeń AdS jest diametralnym przeciwieństwem przestrzeni de Sittera. Ta ostatnia stanowi rozwiązanie równania Einsteina znalezione przez holenderskiego astronoma Willema de Sittera w 1917 roku, opisujące wykładniczo rozszerzający się wszechświat wypełniony dodatnią stałą kosmologiczną $\lambda > 0$ i pozbawiony wszelkiej materii. Przestrzeń anty-de Sittera ma ujemną stałą kosmologiczną $\lambda < 0$ i nie rozszerza się. Wręcz przeciwnie, przypomina wnętrze świata śnieżnej kuli — sferyczny pojemnik ograniczony ze wszystkich stron nieprzenikalną powierzchnią.

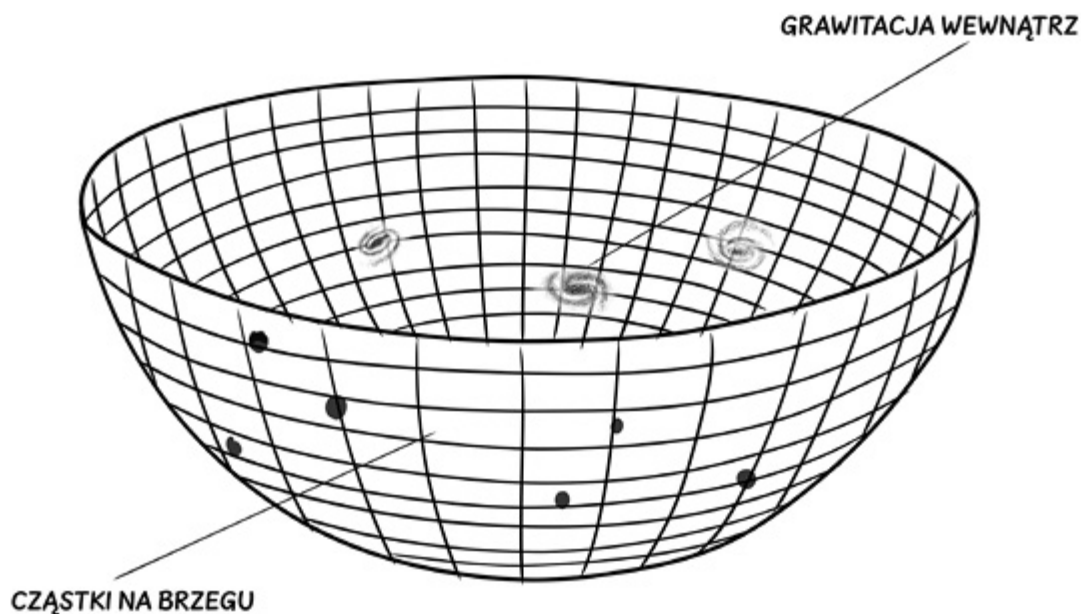
Druga strona dualności Maldaceny obejmuje kwantowe teorie cząstek, podobne do modelu standardowego. Są to kwantowe teorie pola (QFT), ponieważ opisują cząstki i siły jako zlokalizowane wzbudzenia pól kwantowych przenikających przestrzeń. Teorie QFT w dualności Maldaceny przypominają chromodynamikę kwantową stanowiącą część modelu standardowego, która opisuje silne oddziaływanie jądrowe.

Zaskakująca holograficzna natura tej dualności ujawnia się, ponieważ pola kwantowe po stronie cząstek nie rozchodzą się do wnętrza świata śnieżnej kuli AdS, lecz są ograniczone do otaczającej go powierzchni brzegowej. Tak więc QFT najwyraźniej działa w czasoprzestrzeni o jeden wymiar mniejszej. Jeśli przestrzeń AdS ma cztery wymiary czasoprzestrzenne, to QFT operuje w trzech wymiarach. Brakuje jej wewnętrznej głębokości AdS, zakrzywionego wymiaru, który biegnie prostopadle do jej powierzchni brzegowej. QFT jest również pozbawiona grawitacji. Na brzegu przestrzeni AdS nie ma fal grawitacyjnych, czarnych dziur ani niczego przypominającego przyciąganie grawitacyjne. Grawitacja nie istnieje w QFT cząstek.

A przynajmniej tak myśleliśmy. Sednem śmiałej tezy Maldaceny było to, że te dwie teorie bez względu na wzajemne różnice były w rzeczywistości zakamuflowanymi wersjami siebie nawzajem. Maldacena wskazywał, że teoria (super)grawitacji w AdS oraz QFT na brzegu były w pewnym sensie

równoważne. Oto holografia w działaniu! Oznaczałoby to, że wszystko, co trzeba wiedzieć o strunach i grawitacji w czterowymiarowym wszechświecie AdS, jest zapisane w oddziaływaniach kwantowych zwykłych cząstek i pól leżących w całości na trójwymiarowej powierzchni brzegowej. Świat na tej powierzchni będzie funkcjonował jako rodzaj hologramu, jako rzut wewnętrznego świata AdS zawierający wszystkie informacje, ale różniący się bardzo wyglądem. To prawie tak, jakbyśmy mogli dowiedzieć się wszystkiego o wnętrzu pomarańczy, starannie analizując jej skórkę.

W swej najbardziej ambitnej formie dualność holograficzna stwierdza, że brzegowy świat pól i cząstek kwantowych w pełni określa zachowanie grawitacji i materii wewnątrz AdS, a nie jest tylko jego klasycznym lub półklasycznym przybliżeniem. Podwójnie fascynującym jest fakt, że teorie cząstek pojawiające się w dualności Maldaceny należą do najlepiej poznanych kwantowych teorii pola, dogłębnie zbadanych przez fizyków cząstek od połowy XX wieku. Tak więc holografia — w swej ambitnej postaci — stanowi **d z i a ł a j ą c y p r z y k ł a d** pełnej kwantowej teorii grawitacji i materii.



II. 54. Relacje holograficzne zrównują teorię strun i grawitację we wnętrzu

zakrzywionej czasoprzestrzeni z pewnymi kwantowymi teoriami cząstek i pól bez grawitacji działającymi na brzegach tej czasoprzestrzeni.

Był to prawdziwy przełom. Przez dziesięciolecia fizycy usiłowali przypieczętować związek ogólnej teorii względności z teorią kwantową. Od czasu natchnionego odkrycia Maldaceny te dwie pozornie sprzeczne teorie zaczęły działać w symbiozie. Dualność holograficzna pokazała, że teoria względności i teoria kwantowa nie są antagonistkami, lecz jedynie alternatywną perspektywą na tę samą rzeczywistość fizyczną. Zgodnie z założeniami holografii układy fizyczne mogą być jednocześnie grawitacyjne i kwantowe, aczkolwiek w różnych wymiarach. Taką oszałamiającą zmianę perspektywy spowodowała dualność Maldaceny.

Zgodnie z innymi dualnościami w M-teorii natura relacji między obiema stronami w dualności holograficznej jest taka, że gdy obliczenia po jednej stronie są całkowicie przystępne, sytuacja po drugiej stronie będzie bardzo skomplikowana. Na przykład gdy grawitacja jest słaba, a wszechświat AdS jest delikatnie zakrzywiony, opis brzegowy obejmuje tak silne oddziaływania kwantowe między jego składnikami, że QFT staje się całkowicie nierozwiązalna, a pojęcie pojedynczych cząstek przestaje mieć nawet sens.

Ta właściwość sprawia, że dualności holograficzne bardzo trudno udowodnić, ale są też niezwykle potężne. Oznacza to bowiem, że fizycy mogą wykorzystać teorię grawitacji Einsteina i jej rozszerzenie na supergrawitację do tego, aby poznać nowe zjawiska w kwantowym świecie cząstek i odwrotnie. Z biegiem lat dualność holograficzna stała się prawdziwym laboratorium matematycznym, w którym teoretycy przeprowadzali najbardziej pomysłowe eksperymenty myślowe, aby uzyskać lepsze zrozumienie — i pewną intuicję — fascynujących holograficznych podstaw natury. Dzisiejsza fizyka holograficzna rozwinęła swoje skrzydła daleko poza początki M-teorii, tworząc sieć relacji łączących to, co zwykliśmy uważać za odrębne gałęzie

fizyki, od ogólnej teorii względności przez fizykę materii skondensowanej i fizykę jądrową po informację kwantową, a nawet astrofizykę.

Wróćmy jednak do czarnych dziur. Jeśli holografia sprowadza się do pełnej teorii grawitacji kwantowej, aczkolwiek w ramach AdS, to z pewnością rozwiązuje dostrzeżony przez Stephena problematyczny paradoks informacyjny czarnej dziury?

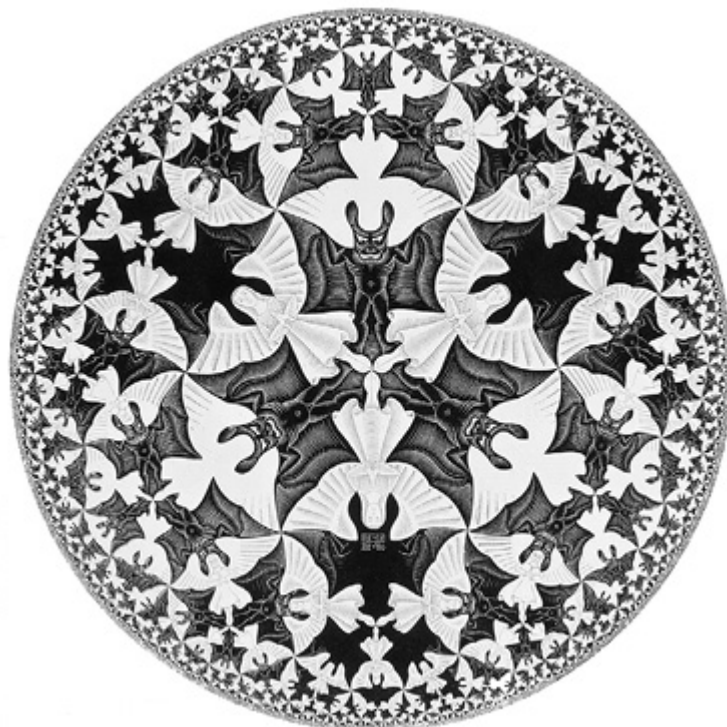
Cóż, to trochę bardziej subtelny problem. Powodem jest to, że opis powierzchniowy Maldaceny koduje wewnętrzny świat AdS w bardzo pomieszany i całkowicie nierozpoznawalny sposób. Nie powinno to dziwić, gdyż nawet zwykły hologram optyczny w niczym nie przypomina trójwymiarowej sceny, która została w nim zapisana. Powierzchnia zwykłego dwuwymiarowego hologramu zawiera kropki i kreski, które wydają się przypadkowe. Przekształcenie ich w trójwymiarowy obraz wymaga złożonej operacji, zwykle w postaci oświetlenia powierzchni hologramu światłem laserowym.

Podobnie potrzeba skomplikowanej operacji matematycznej, aby wydobyć z holograficznego opisu powierzchniowego informację o tym, co się dzieje w przestrzeni AdS. Niestety, dualność holograficzna nie została odkryta wraz ze słownikiem matematycznym, z którego można się dowiedzieć, w jaki sposób obie jej strony przekładają się wzajemnie na siebie. Teoretycy musieli opracować ten słownik, hasło po hasło, aby odczytać hologram i tym samym wyzwolić pełną potęgę dualności holograficznych.

Być może pierwsze hasło, którego powinniśmy szukać w słowniku AdS-QFT, dotyczy najdziwniejszej właściwości dualności: znikającego wymiaru. W jaki sposób cząsteczki i pola, pomimo uwięzienia na powierzchni rejestrują wszystko, co się dzieje we wnętrzu AdS? Każdy strzępek informacji o całym wszechświecie AdS musi być w jakiś sposób zakodowany w QFT, ponieważ w przeciwnym razie dualność nie byłaby dualnością. Jak więc kwantowe teorie pola potrafią „wchłonąć” cały wymiar?

Kluczową właściwością AdS jest to, że wymiar wewnętrzny prostopadły do powierzchni brzegowej jest mocno zakrzywiony. Człon „anty” w przestrzeni anti-de Sittera odnosi się do faktu, że przestrzeń AdS ma krzywiznę ujemną, co oznacza, że kąty trójkąta dają w sumie mniej niż 180 stopni. (Na powierzchni Ziemi z dodatnią krzywizną lub w przestrzeni de Sittera kąty trójkąta sumują się do nieco ponad 180 stopni). Krzywizna ujemna oznacza, że rzut AdS na płaską powierzchnię wywołuje efekt anty-Merkatora: obszary w pobliżu brzegu wyglądają na mniejsze (w przeciwieństwie do większych na mapie Merkatora powierzchni Ziemi).

Dwuwymiarowy przestrzenny przekrój biegnący przez wnętrze AdS rzutowany na płaską powierzchnię wygląda bardzo podobnie do słynnego drzeworytu *Granice kręgu IV* Mauritsa Cornelisa Eschera, przedstawiającego dysk z powtarzającymi się w nieskończoność postaciami aniołów i demonów (zob. il. 55). W przestrzeni AdS z ujemną krzywizną wszystkie anioły i demony mają ten sam rozmiar. Ale w spłaszczonym rzucie Eschera figury te stają się coraz mniejsze i nawarstwiają się w pobliżu kolistego brzegu, zanikając w formie nieskończonego fraktala na krawędzi.



II. 55. Granice kręgu /V Mauritsa Cornelisa Eschera.

Jeśli teraz wyobrazimy sobie, że rzutujemy jeden z aniołów (lub demonów) z drzeworytu Eschera na kolisty brzeg dysku, na przykład tworząc jego cień w postaci odcinka, to byłby on krótszy w przypadku anioła znajdującego się blisko krawędzi i większy dla tego samego anioła znajdującego się głęboko we wnętrzu. I tak właśnie działa holografia: dualność Maldaceny przekłada „głębokość wnętrza” w AdS na „rozmiar” na brzegu. Zatem pierwsze hasło w słowniku AdS-QFT mówi, że w świecie brzegu wzrost i zmniejszanie odpowiada ruchowi w kierunku prostopadłym do brzegu we wszechświecie AdS z krzywizną — odpowiednio albo zbliżaniu się do brzegu, albo oddalaniu się od niego.

Tak naprawdę koncepcja, że w kwantowych teoriach pola zwiększanie lub zmniejszanie odpowiada poruszaniu się w dodatkowym wymiarze, ma długą historię. W fizyce cząstek wielkość jest ściśle związana z energią. Fizycy cząstek chcą mieć coraz większe akceleratory, ponieważ zwiększenie energii zderzeń cząstek pozwala badać naturę na mniejszych odległościach. Przypomina to kupno lepszego mikroskopu. Co najważniejsze, zbiór wzbudzeń cząstek i oddziaływań opisywanych przez daną teorię QFT zależy od przyjętej rozdzielczości. Rodzina cząstek w QFT stosowanej przy niskich energiach lub dużych skalach odległości może bardzo różnić się od cząstek i sił wysuwających się na pierwszy plan w tej samej teorii przy wysokich energiach. Tak więc podstawowa cecha wielkości — lub energii — w kwantowych teoriach pola zawiera dodatkowe informacje. W połowie XX wieku fizycy rozwinęli formalizm matematyczny, który określa dokładnie, jak zmieniają się właściwości danej kwantowej teorii pola, gdy zmienia się skalę energii, w której jest ona używana. Dualność Maldaceny sprytnie wykorzystuje tę właściwość. Słownik AdS-QFT przekłada abstrakcyjny „wymiar energii” teorii QFT na „zakrzywiony wymiar przestrzeni” po stronie grawitacji.

Ale co z bez wątpienia fascynującym hasłem „czarna dziura” w słowniku AdS-QFT?

W ciągu kilku miesięcy od publikacji Maldaceny Witten umieścił czarną dziurę we wnętrzu AdS, przetłumaczył ją na teorię brzegową i spojrzął na jej hologram. Ponieważ w świecie brzegu nie ma grawitacji — przynajmniej w znanym nam sensie — nie powinniśmy oczekiwać, że hologram czarnej dziury będzie przypominał bezdenną studnię czasoprzestrzenną znaną z teorii względności Einsteina. I tak rzeczywiście jest. Kiedy Witten badał dualny opis czarnej dziury, znalazł rój gorących cząstek. Holografia najwyraźniej przekształca najbardziej zagadkowe obiekty we wszechświecie w coś całkiem zwyczajnego. Holograficzna opowieść o cyklu życia czarnych dziur, cyklu, który okazał się tak trudny do uchwycenia w języku grawitacji, brzmi podobnie do ogrzewania i późniejszego chłodzenia plazmy gorących kwarków i gluonów, procesu bardzo przypominającego to, co fizycy doświadczalni wytwarzają na co dzień w swoich laboratoriach w zderzeniach ciężkich jąder. Ponadto entropia cieplna gorącej zupy kwarkowej na powierzchni brzegowej jest równa entropii czarnej dziury we wnętrzu AdS, stanowiąc oczywiście ważny test dualności holograficznej. Matematyczna obserwacja, że entropia czarnej dziury rośnie podobnie jak powierzchnia horyzontu, nie jest zaskakująca w świetle tej dualności, ponieważ powierzchnia horyzontu i zupa kwarkowa znajdują się w tej samej liczbie wymiarów.

Po chwili namysłu, tworząc niejako przypis do hasła o czarnej dziurze, Witten zauważył, że opis powierzchniowy formowania i parowania czarnych dziur wydaje się zgodny z teorią kwantową. Dualność holograficzna z pozoru rozwiązywała paradoks Hawkinga. Dzieje się tak dlatego, że całkiem zwyczajne skupiska cząstek tworzące dualny opis czarnych dziur mają funkcje falowe, które ewoluują w sposób gładki i zachowujący informację, zgodnie ze zwykłymi prawami kwantowymi **b e z** grawitacji. Chociaż dynamika kwantowa gorących kwarków może zakłócać i przekształcać informację, wiemy na pewno, że ich nie niszczy, ponieważ nie jest to możliwe w QFT.

Zatem zgodnie z logiką dualności wszystkie informacje wewnątrz parujących czarnych dziur we wszechświecie AdS muszą ostatecznie wyciekać i znaleźć się w emitowanym promieniowaniu Hawkinga.

Można więc pomyśleć, że odkrycia Maldaceny i Wittena sprawiły, iż Stephen szybko zmienił swoje podejście do kwestii losu informacji wewnątrz czarnych dziur. Tak się jednak nie stało.

Dlaczego? Ponieważ argument Wittena nie w pełni wyjaśnia hasło paradoksu informacyjnego w słowniku AdS-QFT. Oparte na dualności rozumowanie Wittena, że wszystkie podstawowe bity wewnątrz zapadającej się gwiazdy ostatecznie przetrwają, jest ściśle formalne. Nie wyjaśnia, w jaki sposób informacje ostatecznie trafiają do promieniowania Hawkinga. Dualność mówi tylko, że jakoś to się dzieje. Gdyby pod koniec 1998 roku dzielny astronauta zadzwonił do Princeton, aby na wszelki wypadek upewnić się, czy uda mu się wydostać z czarnej dziury, tamtejsi teoretycy powiedzieliby mu: „Oczywiście, będziesz po prostu bardzo rozbełtany”. Ale gdyby naciskał na nich, jak to zrobić, Witten i jego koledzy musieliby przyznać, że nie mają bladego pojęcia. Grawitacyjny opis ucieczki z parującej czarnej dziury pozostawał głęboko tajemniczy we wczesnych latach fizyki holograficznej. Niesamowita dualność Maldaceny z powodzeniem usunęła wszelkie formalne sprzeczności między teorią kwantową a czarnymi dziurami, lecz nie wyjaśniła, gdzie Stephen popełnił błąd w swych pierwotnych obliczeniach opierających się na grawitacji. Zrozumiałe jest więc i dobrze o nim świadczy, że Stephen nalegał na rozwiązanie tego paradoksu na własnych warunkach: w ramach opisu sposobu ucieczki w języku grawitacji i geometrii, który nie wymagał od niego ślepej wiary w dualną magię.

Minęło kolejne sześć lat, zanim Stephen wreszcie rozwiązał ten problem i publicznie ogłosił, że mechanika kwantowa działa poprawnie w obecności czarnych dziur. Uczynił to w sposób bardzo spektakularny. Wybranim miejscem tego wydarzenia była XVII Międzynarodowa Konferencja Ogólnej

Teorii Względności i Grawitacji w Dublinie w lipcu 2004 roku. Było to tego samego rodzaju spotkanie, na którym w 1965 roku po raz pierwszy przedstawił swoje twierdzenie o osobliwościach Wielkiego Wybuchu. Kiedy Stephen wysłał e-mail do organizatorów konferencji, aby poprosić o przyznanie miejsca dla prelegenta, który „rozwiązał paradoks informacyjny czarnej dziury”, nie tylko je otrzymał, ale też zarezerwowano mu je w głównej sali koncertowej Królewskiego Towarzystwa Dublińskiego. Niedługo potem komitet organizacyjny musiał się borykać z problemem zbyt małej liczby przepustek prasowych wydanych na wykład naukowy.

Jak zwykle konferencja była okazją dla zespołu Hawkinga do nadrobienia zaległości. Dzień przed wykładem Stephena poszliśmy na drinka do baru Temple w Dublinie. Delektując się nieczęstą chwilą spokoju, Stephen zwiększył głośność swojego syntezyzatora mowy. *Wychodzę z ukrycia* — oświadczył z szerokim uśmiechem. I rzeczywiście, następnego dnia Hawking wyjaśnił sali wypełnionej niezwykle mieszaniną fizyków i dziennikarzy, że czarne dziury nie są bezdennymi studniami, jak kiedyś uważał, lecz uwalniają wszystko, co można wiedzieć o ich przeszłości, w trakcie promieniowania i znikania. Podczas konferencji prasowej po wykładzie Stephen spłacił dług elokwentnemu fizykowi z Caltechu Johnowi Preskillowi, który w 1997 roku założył się ze Stephenem i Kipem Thorne'em, że wszystkie informacje ostatecznie wyciekają z parujących czarnych dziur. Zakład przewidywał, że „przegrany nagrodzi zwycięzcę encyklopedią wybraną przez zwycięzcę, z której można czerpać informacje w dowolnym momencie”. Stephen wręczył Johnowi egzemplarz książki *Wszystko o bejsbolu. Największa encyklopedia bejsbolu*, choć nie omieszkął wspomnieć, że być może powinien był dać mu jej spopieloną wersję. John uniósł encyklopedię nad głowę w geście tryumfu, jakby właśnie wygrał finał ligi. Błysnęły flesze i jedno z tych zdjęć trafiło do czasopisma „Time”.

Jednak występ Stephena w Dublinie był nieco niezręcznym spektaklem. Oczywiście od dawna przywykliśmy do tego, że każda jego myśl o czarnych

dziurach nabiera własnego życia na arenie publicznej. Doskonale komunikując się z publicznością na całym świecie — i od dziecka dobrze funkcjonując w ramach kultury masowej — Stephen stał się jednym z najważniejszych głosów nauki naszych czasów, inspirującym miliony na całym świecie. Ale dubliński występ stanowił rzadką okazję, gdy zatarła się granica między publiczną ikoną Stephena a należytą praktyką naukową, gdyż pomimo medialnej wrzawy wokół wolty Stephena w kwestii czarnych dziur ani jego wykład w Dublinie, ani późniejszy artykuł na ten temat nie posunął sprawy do przodu — nie mówiąc już o jej rozstrzygnięciu. Większość obecnych na spotkaniu teoretyków strun doszła do wniosku sześć lat wcześniej, że czarne dziury nie niszczą informacji, i potraktowali deklarację Stephena za bardzo spóźnioną. Relatywiści pozostali natomiast nieprzekonani zawitym wywodem Stephena i czuli, że przedwcześnie zmienił zdanie. Jednym z nich był Kip Thorne, który w Dublinie nie uznał zakładu za przegrany — i nie sądzę, żeby kiedykolwiek to uczynił.

Stephen podążał za swą nową próbą wyjaśnienia paradoksu informacyjnego czarnej dziury razem z dzielnym Francuzem Christophe'em Galfardem, swym ówczesnym studentem, który miał to (nie)szczęście pojawić się w drzwiach gabinetu Stephena w „roku czarnej dziury”. Christophe również zdał sobie sprawę, że ich obliczenia nie działały tak zgrabnie, jak tego oczekiwali, ale raczej wskazywały nadal na głębsze pytania. Dlaczego więc Stephen wszedł na scenę w świetle dublińskich jupiterów, aby oświadczyć, że informacja nie ginie w czarnych dziurach? Co sprawiło, że pomimo braku mocnych dowodów postanowił jednak zmienić swoje podejście do zachowania informacji? Moim zdaniem skupił się na niejasnym i niedocenianym elemencie holografii, który uważał za klucz do rozwiązania tego paradoksu, czyli że jest więcej niż jedno wnętrze.

Hologram powierzchniowy koduje nie tylko pojedynczą wewnętrzną zakrzywioną geometrię, ale także mieszankę różnych kształtów czasoprzestrzeni¹⁰. Oznacza to, że dualność holograficzna najwyraźniej wrasta

w owo radykalne myślenie kwantowe o grawitacji *à la* Feynman, o którym pisałem w poprzednim rozdziale i które okazało się kluczowe dla rozwikłania kosmologicznego paradoksu informacyjnego. Holografia wzmacnia te idee i przewiduje, że na pewnym poziomie grawitacja obejmuje nie pojedynczą geometrię czasoprzestrzeni, lecz ich superpozycję. Zachęca nas to do myślenia o wnętrzu AdS jako o funkcji falowej, a nie pojedynczej czasoprzestrzeni.

„Jeśli mówimy, że czarna dziura jest opisana przez geometrię Schwarzschilda, mamy problem z utratą informacji” — oznajmił Stephen słuchającej go publiczności w Dublinie¹¹. I kontynuował: „Jednak informacja o dokładnym stanie jest przechowywana w innej geometrii. Zamieszanie i paradoks wynika stąd, że myśleliśmy klasycznie w kategoriach pojedynczej obiektywnej czasoprzestrzeni. Ale suma Feynmana po geometriach dopuszcza obie geometrie naraz”.

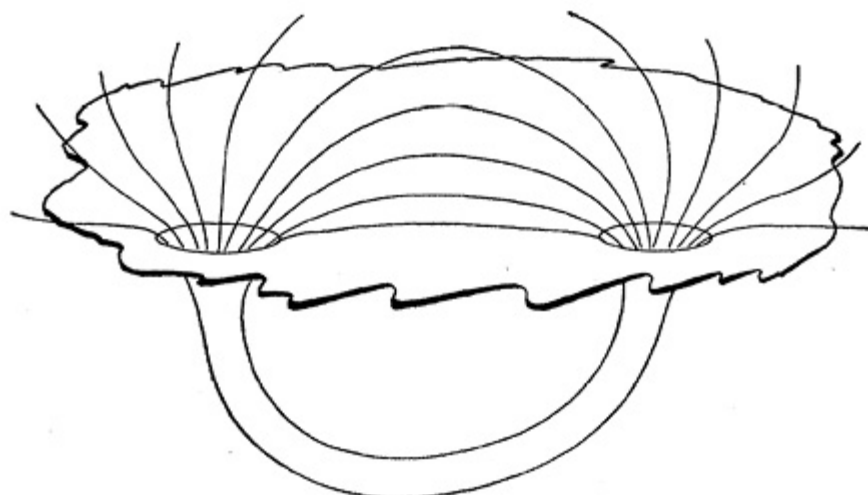
To były słowa nowego odgórnego Hawkinga.

W swoim pierwotnym wyprowadzeniu promieniowania Hawkinga oddolny Hawking (bardzo rozsądnie) założył, że każde wydostające się promieniowanie porusza się w czasoprzestrzeni czarnej dziury, zakrzywionej geometrii odkrytej przez Schwarzschilda w 1916 roku. Oczywiście tego rodzaju założenie wyklucza możliwość, że w dłuższej perspektywie mogłoby się pojawić zupełnie nowy kształt przestrzeni. Trzydzieści lat później Stephen dostrzegł, że to rozumowanie było odrobinę zbyt klasyczne. Teraz ogłosił, że gdy czarne dziury się starzeją, wiele informacji o nich i ich historii nie jest już przechowywanych w pierwotnej geometrii czarnej dziury, ale w zupełnie innej czasoprzestrzeni. Tak więc nowy odgórny Stephen przyznał — kto wie, być może niechętnie — że jego młodszy odpowiednik popełnił błąd, zanim jeszcze rozpoczął obliczenia, gdy założył, że czasoprzestrzeń jest zadana.

Z perspektywy czasu odgórny Stephen miał rację w swojej intuicji, iż w grę wchodziła inna geometria. Czysto kwantowe myślenie w kategoriach sum po geometriach wewnętrznych zastępujących pojedynczą geometrię ostatecznie okazało się kluczem do rozwiązania paradoksu czarnych dziur. Kontrowersje

wokół wykładu Stephena w Dublinie dotyczyły braku określenia, w jakim zakrzywionym kształcie mogła być zapisana przeszłość dawnej czarnej dziury. W praktyce zasugerował (niesłusznie), że możliwość, iż w ogóle nie było czarnej dziury, wystarczyła do rozwiązania tego paradoksu.

Wymagało to znacznie więcej pracy w holograficznym laboratorium Maldaceny i zbadania wielu innych ślepych uliczek, zanim teoretycy zaczęli wreszcie dostrzegać drogę ucieczki z dawnej czarnej dziury. Prawdę mówiąc, w latach po śmierci Stephena nowe pokolenie fizyków czarnych dziur, w pełni korzystających z holografii, zdało sobie sprawę, że być może w grę wchodzi tunele czasoprzestrzenne. Są to egzotyczne kształty przestrzeni przypominające uchwyty, odgrywające rolę geometrycznych pomostów łączących odległe miejsca lub momenty w czasoprzestrzeni. Ilustracja 56 pokazuje wykonany przez Wheelera w 1957 roku pierwszy szkic tunelu przestrzennego, który wówczas nazywał „przestrzenią wielospójną”. Tymczasem w 2019 roku Geoff Penington, pracujący samodzielnie na Uniwersytecie Stanforda, oraz kwartet strunowy z Princeton–Santa Barbara, którego członkami byli Ahmed Almheiri, Netta Engelhardt, Donald Marolf i Henry Maxfield, znaleźli przekonujące dowody na to, że w połowie procesu parowania czarna dziura może przejść zaskakującą przebudowę¹².



II. 56. Pierwsze schematyczne przedstawienie tunelu czasoprzestrzennego sporządzone przez Johna Wheelera, który po raz pierwszy użył tego terminu w 1957 roku do opisu tuneli w geometrii czasoprzestrzeni łączących dwa odległe punkty. W ostatnich latach teoretycy zasugerowali, że tunele czasoprzestrzenne mogą stanowić drogę ucieczki informacji z sędziwej parującej czarnej dziury.

Ich obliczenia wykazały, że powolne, ale stopniowe nagromadzenie wypromieniowanych cząstek może w końcu aktywować ukrytą geometrię tunelu czasoprzestrzennego w superpozycji Feynmana, tworząc geometryczny tunel prowadzący przez horyzont, który umożliwia ucieczkę informacji¹³.

Uważa się, że odległe promieniowanie dokonało tego niezwykłego wyczynu, wykorzystując subtelne zjawisko mechaniki kwantowej zwane **splątaniem kwantowym**. Pamiętajmy, że promieniowanie Hawkinga pochodzi z kwantowych fluktuacji pól w pobliżu horyzontu czarnych dziur. Te fluktuacje powodują powstawanie par cząstka–antycząstka. Zawsze, gdy antycząstka wpada do czarnej dziury, jej partner może uciec do dalekiego wszechświata, gdzie pojawia się pod postacią promieniowania Hawkinga emitowanego przez czarną dziurę. Jednak pomimo odległości pary cząstek i antycząstek utrzymują ze sobą kwantowomechaniczny związek. Fizycy mówią, że są „splątane”. Splątanie oznacza, że jeśli zmierzymy samo emitowane promieniowanie, wygląda ono jak przypadkowe promieniowanie cieplne. Jeśli jednak będziemy rozważać oba elementy par łącznie, okaże się, że zawierają one informacje zapisane w subtelnych korelacjach łączących ich poszczególne właściwości. To tak jak szyfrowanie danych hasłem. Dane bez hasła to nonsens. Hasło (jeśli wybraliśmy odpowiednie) również nie ma znaczenia. Ale stosując je razem, odzyskujemy informacje. To, co odkryli Pennington i kwartet strunowy — a wielu fizyków rozwinęło od tego czasu — to fakt, że trwające przez eony stopniowe narastanie coraz ściślejzego splątania kwantowego między wnętrzem i zewnątrz parującej czarnej dziury można traktować jako powstawanie tunelu czasoprzestrzennego

rozciągającego się przez horyzont. To tak, jakby cząstki promieniowania Hawkinga wraz ze swoimi antycząstkami za horyzontem wspólnie budowały most czasoprzestrzenny, przekształcając dawną czarną dziurę z pustelniczego królestwa w rodzaj przeprawy.

Co więcej, splątanie kwantowe wydaje się również kluczowym sposobem działania hologramów Maldaceny w ogólnym przypadku. To dotyka być może najbardziej oczywistego i jednocześnie najgłębszego hasła w słowniku AdS-QFT: grawitacja i zakrzywiona czasoprzestrzeń są zjawiskami emergentnymi. Lata badań pokazały, że aby w hologramie powierzchniowym zapisać zakrzywioną geometrię wnętrza, nie wystarczy dysponować powierzchnią brzegową z ogromną liczbą cząstek. Zamiast tego zakrzywione wnętrze pojawia się tylko wtedy, gdy splątanie kwantowe łączy ze sobą wiele składników brzegowych. O dziwo, splątanie kwantowe wydaje się kluczowym mechanizmem generującym grawitację i zakrzywioną czasoprzestrzeń w fizyce holograficznej. Jest dla hologramu Maldaceny tym, czym światło lasera dla zwykłego hologramu optycznego.

Jest to niezwykle spostrzeżenie. Einstein wykazał, że grawitacja jest przejawem zakrzywionej czasoprzestrzeni. Holografia idzie dalej i postuluje, że zakrzywiona czasoprzestrzeń utkana jest ze splątania kwantowego. Tak jak druga zasada termodynamiki wynika ze statystycznego zachowania wielu klasycznych cząstek, lub fale dźwiękowe powstają w wyniku zsynchronizowanych drgań cząsteczek materii, tak dualność holograficzna wyraża pogląd, że ogólna teoria względności Einsteina wyłania się ze zbiorowego splątania niezliczonych cząstek kwantowych poruszających się po niższej wymiarowej powierzchni brzegowej. Sąsiednie regiony we wnętrzu AdS odpowiadają silnie splątanym elementom na powierzchni brzegowej. Odległe fragmenty przestrzeni wewnętrznej odpowiadają słabiej splątanym obszarom brzegu. Jeśli konfiguracja powierzchni ma uporządkowany wzór splątania, pojawia się niemal puste wnętrze. Jeśli układ na powierzchni jest w stanie chaotycznym, a wszystkie jego elementy są ze sobą splątane, we wnętrzu

znajduje się czarna dziura. A jeśli wykonamy niezwykle złożoną operację kwantową na splątanych kubitach w nadziei na odczytanie historii czarnej dziury, to okaże się, że odkryjemy wewnętrzną geometrię tunelu czasoprzestrzennego.

W tym wszystkim zawiera się niezwykle element podejścia odgórnego. W języku poprzedniego rozdziału można powiedzieć, że splątane bity powierzchni brzegowej pełnią funkcję obserwowalności. W kosmologii odgórnej dane na powierzchni obserwacji wybierają przeszłą historię ekspansji wszechświata z oceanu możliwej przeszłości. Holografia przewiduje, że w podobny sposób wzorce splątania na sferycznej powierzchni brzegowej pomagają określić kształt przestrzeni wewnętrznej. Tak więc zarówno holografia, jak i kosmologia odgórna w niesamowity sposób odwracają zwykły porządek rzeczy w fizyce: zakrzywiona czasoprzestrzeń pojawia się w następstwie „zadanego pytania”.

W dzisiejszych czasach odbywają się konferencje na temat grawitacji kwantowej w laboratorium, podczas których teoretycy grawitacji i doświadczalnicy kwantowi omawiają sposoby wytwarzania silnie splątanych układów kwantowych zbudowanych z uwięzionych atomów lub jonów, wykazujących pewne właściwości czarnych dziur. Eksperymentując z tymi układami, możemy mieć nadzieję, że dowiemy się więcej o rodzajach wzorców splątania leżących u podstaw wyłaniania się grawitacji oraz o tym, co się dzieje z czasoprzestrzenią, gdy utrzymujące ją w całości splątanie kwantowe rozpada się. To naprawdę bardzo ekscytujące osiągnięcia. Kto by pomyślał u zarania rewolucji holograficznej w połowie lat dziewięćdziesiątych, że doświadczalnicy kwantowi będą wygłaszać kluczowe wykłady na temat modeli czarnych dziur na konferencjach strunowych w latach dwudziestych nowego stulecia?

Szkoda, że Stephen nie doczekał tych zaskakujących nowych wniosków. Z pewnością byłby zachwycony, widząc tunele czasoprzestrzenne wyłaniające się jako nieuchwytnie drogi ewakuacyjne z parujących czarnych dziur.

Możemy się tylko zastanawiać, jakim zwięzłym zdaniem by to opisał. Sądę, że byłby zachwycony, gdyby mógł ujrzeć jeszcze jeden poziom zależności między naszym rozumieniem czarnych dziur a wczesnym wszechświatem — dwoma tematami, które zawsze nadawały kierunek jego działaniom. W całej karierze naukowej wnioski płynące z badania czarnych dziur często wpływały na jego prace nad kosmologią, od twierdzenia Penrose'a o osobliwościach czarnych dziur po odkrycie promieniowania Hawkinga. Pojawienie się holografii doprowadziło do jeszcze bliższego wzajemnego oddziaływania między dwoma nurtami, dzięki spostrzeżeniom kosmologicznym takim jak podejście odgórne, które zaczęliśmy opracowywać w 2002 roku, inspirując jego prace nad czarnymi dziurami w 2004 roku.

Niektórzy teoretycy strun są zdezorientowani ostatnimi postępami w teorii czarnych dziur. Zawsze mieli nadzieję, że rozwiązanie paradoksu informacyjnego czarnej dziury zastąpi dziwną, na wpół klasyczną mieszankę geometrii Hawkinga czymś zupełnie innym. Tymczasem wydaje się teraz, że powinniśmy poważnie potraktować Hawkingowską superpozycję geometrii i że taki sposób myślenia o grawitacji kwantowej, o ile podejziemy do tego wystarczająco poważnie, przekroczy oczekiwania wszystkich (oczywiście z wyjątkiem Hawkinga, który zawsze mierzył wysoko). Chociaż wiele jeszcze pozostaje do zrobienia, zanim będziemy w stanie opisać historię czarnej dziury na podstawie jej popiołów — promieniowania Hawkinga — wielu teoretyków zgadza się obecnie, że nie mamy już tutaj do czynienia z prawdziwym paradoksem. Co więcej, uważam, że ten rozwój **j e s t** czymś zupełnie innym. Przejście od pojedynczej obiektywnej czasoprzestrzeni do emergentnych czasoprzestrzeni ma prawdziwie fundamentalne konsekwencje.

Zmiana ta po pierwsze sygnalizuje koniec dawnego redukcjonistycznego snu w fizyce fundamentalnej. Redukcjonizm jest niezwykle udaną koncepcją, zgodnie z którą strzałki wyjaśniające w nauce zawsze wskazują w dół, w kierunku niższych poziomów złożoności. Utrzymuje, że w wielopiętrowym gmachu nauki, od fizyki przez chemię po biologię, zjawiska na wyższych

poziomach można w zasadzie wyjaśnić w kategoriach zjawisk na poziomach niższych. Redukcjonizm nie oznacza, że wyjaśnienia niższego poziomu są zawsze potrzebne, przydatne, a nawet praktycznie osiągalne. Nie stoi też w sprzeczności z pojawianiem się nowych zjawisk i „praw” na wyższych poziomach złożoności. Cały redukcjonizm polega na tym, że takie prawa wyższego poziomu nie są oderwane od swoich korzeni niższego poziomu; rozumiemy jakościowo zjawiska biologiczne w kategoriach chemicznych, a zjawiska chemiczne w kategoriach fizycznych. A jeśli mamy wystarczająco potężne komputery, aby symulować złożone układy biologiczne na mikroskopowym poziomie ich chemii molekularnej, obserwujemy rzeczywiste pojawianie się ich biologicznego zachowania.

Ale co z absolutnie najniższym poziomem podstawowych praw fizyki? Czy to jest solidny fundament — struktura absolutów — który leży u podstaw wszystkich wyższych poziomów gmachu nauki? Holografia maluje zupełnie inny obraz. Jeśli splątanie — owo upiorne zjawisko, które tak bardzo niepokoiło Einsteina i za które przyznano Nagrodę Nobla z fizyki w 2022 roku — jest kluczowe w tworzeniu czasoprzestrzeni, to stawianie redukcjonizmu w opozycji do emergencji może się wydawać zbyt ograniczonym sposobem patrzenia na świat. Holografia umieszcza fundamentalny element emergencji w samych korzeniach fizyki — w strukturze czasoprzestrzeni. Dualność holograficzna ucieleśnia pogląd, w którym fizyczna rzeczywistość naszego doświadczenia i „fundamentalne” prawa, którym podlega, wyłaniają się z połączenia podstawowych cegiełek **o r a z** sposobu, w jaki są splątane. Tworzy to rodzaj zamkniętej pętli współzależności, która prowadzi od redukcji do emergencji i z powrotem. Holografia utrzymuje, że nawet najbardziej elementarne, przypominające prawa prawidłowości mogą ostatecznie być zakorzenione w złożoności otaczającego nas wszechświata. Co prowadzi nas do pytania: Jakie są kosmologiczne implikacje tego wniosku?

Po odkryciu przez Maldacene holograficznej natury przestrzeni anty-de Sittera teoretycy natychmiast zaczęli się zastanawiać, czy nasz rozszerzający się wszechświat może również być hologramem. W notatnikach, w których zapisywałem niektóre moje rozmowy ze Stephenem, znalazłem jego rozmyślenia o możliwym powierzchniowym opisie rozszerzającej się przestrzeni de Sittera już w lutym 1999 roku. Ale dopiero kiedy nasze odgórne podejście znalazło się na właściwej ścieżce, ponad dziesięć lat później, zaczęliśmy na poważnie realizować koncepcję holograficznej kosmologii.

Niestety, wtedy już Stephen tracił resztki kontroli nad swoimi mięśniami, które cudem udało się mu zachować przez tak wiele lat życia ze stwardnieniem zanikowym bocznym (ALS). Ze słabo jeszcze poznanych powodów długie komórki nerwowe — przewodzące sygnały elektrochemiczne z mózgu do kręgosłupa i z kręgosłupa do mięśni — u pacjentów z ALS zanikają i obumierają, powodując atrofię pozbawionych impulsów mięśni. Do tego czasu choroba praktycznie całkowicie przejęła kontrolę nad mięśniami Stephena. Oczywiście to poważnie ograniczyło jego swobodę działań. We wczesnych etapach naszej współpracy Stephen mógł sterować wózkiem inwalidzkim, jeżdżąc w poszukiwaniu kolegów, i z pilotem trzymanym ostrożnie w prawej ręce prowadził z nimi rozmowy. W tym momencie Stephen nie mógł już poruszać się samodzielnie, co w praktyce oznaczało, że jego naukowe interakcje ograniczyły się do dużo węższego kręgu współpracowników. Co więcej, postęp choroby utrudnił Stephenowi korzystanie z programem Equalizer za pomocą pilota. To przestarzałe urządzenie, odgrywające przez tyle lat rolę pępowiny łączącej jego umysł ze światem zewnętrznym — od rozmów i e-maili po prowadzenie rozmów telefonicznych i guglowanie — zostało zastąpione czujnikiem zamontowanym na okularach aktywowanym lekkim poruszeniem policzkiem. Stanowiło to ważny kanał komunikacyjny, ale nie przywracało mu zdolności do prowadzenia dyskusji na przykład przy lunchu lub kolacji, co wcześniej było kluczowym forum wymiany idei z szerszym gronem jego współpracowników.

(W latach dziewięćdziesiątych Stephen lubił żartować, że naprawdę może jednocześnie jeść i rozmawiać). Tak więc Stephen był stale zagrożony izolacją. Prawdopodobnie niezdolność do płynnej komunikacji w późniejszych latach okazała się największym ograniczeniem w jego życiu naukowym. Oznaczało to, że nie mógł już w pełni uczestniczyć w tych ożywionych dyskusjach na wszystkie tematy — od znaku minus w równaniu po zalety filozofii — których wszyscy potrzebujemy, aby udoskonalić i przetestować swoje idee. Chociaż wszystkie jego zdolności poznawcze pozostały nienaruszone, w ciągu ostatniej dekady swojego życia niekiedy stawał się prawie całkowicie odcięty od świata.

Co gorsza, pojawiły się u niego problemy z oddychaniem i wszyscy obawialiśmy się, że wkrótce nie będzie już mógł w ogóle się poruszać. Wówczas jego zespół wsparcia zainstalował wentylator medyczny na wózku inwalidzkim, który stał się pewnego rodzaju połączeniem mobilnego modułu klimatyzacji z węzłem informatycznym. Wkrótce znów mógł wrócić do pracy. Ponadto jego zamożni znajomi oddali mu do dyspozycji swoje odrzutowce, by mógł nimi latać po całym świecie, co ułatwiło podróżowanie w porównaniu do naszych poprzednich wypraw. Często latał do Houston, ponieważ zaprzyjaźnił się z teksańskim nafciarzem George'em P. Mitchellem, który podjął się inicjatywy zapraszania Stephena i grona jego bliskich współpracowników na coroczne spotkania z fizyką na swoim ranczu, „aby stworzyć warunki, w których Stephen mógłby pracować”. I tym się właśnie zajmował Stephen. Z dala od zgiełku gabinetu w Cambridge, rok po roku byłem świadkiem, jak dociekliwy umysł Hawkinga ożywa w teksańskich lasach. To właśnie na ranczu Mitchella, gdzie sesje przy tablicy płynnie przechodziły w dyskusje przy kolacji i ognisku, narodziła się holograficzna teoria wszechświata Stephena.

Pierwszą przeszkodą w zastosowaniu holografii do kosmologii jest to, że nie żyjemy w świecie śnieżnej kuli anty-de Sittera. Zamieszkujemy rozszerzający

się wszechświat bardziej przypominający przestrzeń de Sittera. W klasycznym podejściu AdS i jej desitterowe przeciwieństwo mają bardzo odmienne właściwości. Ujemna krzywizna AdS tworzy pole grawitacyjne, które przyciąga obiekty ku sobie w kierunku środka tej przestrzeni. Natomiast dodatnia krzywizna rozszerzającego się wszechświata de Sittera powoduje, że wszystkie obiekty odpychają się nawzajem. Różnicę tę można przypisać znakowi λ , stałej kosmologicznej znanej również jako człon ciemnej energii w równaniu Einsteina. Wszechświat taki jak nasz ma dodatnie λ , co powoduje jego rozszerzanie, podczas gdy AdS ma ujemne λ wywierające dodatkowy przyciągający efekt. Co więcej, w przeciwieństwie do AdS rozszerzające się wszechświaty wydają się nawet nie mieć powierzchni brzegowej, na którą mógłby być rzutowany hologram. Niektóre rozszerzające się wszechświaty są hipersferycznymi, trójwymiarowymi wersjami sfery. Hipersfery nie mają brzegu, na którym moglibyśmy próbować zapisać to, co dzieje się wewnątrz. Dlatego wydaje się niemożliwe skonstruowanie czegoś takiego jak holograficzna dualność Maldaceny.

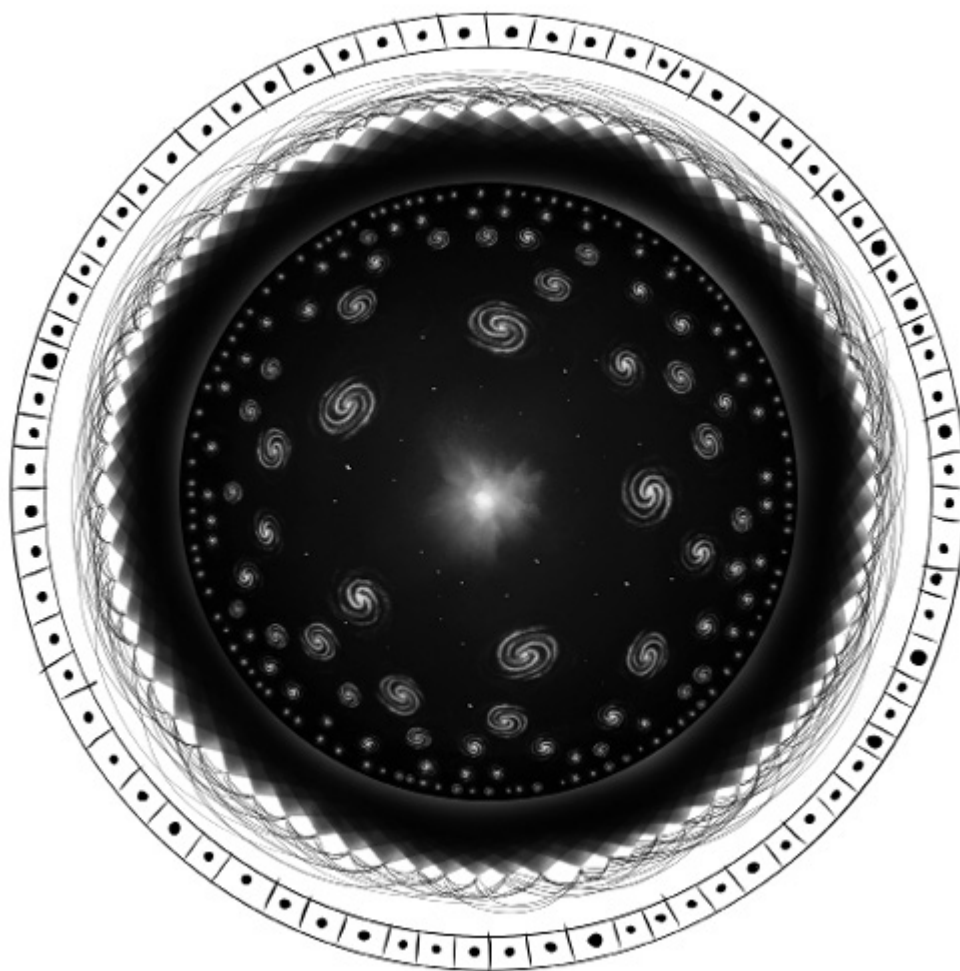
A gdybyśmy porzucili myślenie klasyczne i zamiast niego przyjęli półklasyczny punkt widzenia? Co, jeśli wyobrazimy sobie AdS i jej przeciwieństwo w czasie urojonym? W końcu główną motywacją do opracowania holograficznej kosmologii było lepsze zrozumienie kwantowego zachowania wszechświata, a Stephen od dawna utrzymywał, że geometrie o czterech wymiarach przestrzennych zawierają jego właściwości kwantowe. To było sedno jego euklidesowego podejścia do grawitacji kwantowej (zob. rozdział 3). Pamiętacie okrąg, który mu narysowałem w szpitalu (zob. il. 25)? Reprezentował on krawędź dysku, który otrzymamy, gdy rzutujemy kwantową ewolucję kołowego inflacyjnego wszechświata pokazanego na ilustracji 23b na płaszczyznę. Ilustracja 57 przywołuje to rzutowanie w bardziej szczegółowy sposób. Początek wszechświata pozbawiony brzegów znajduje się w środku dysku, gdzie czas przekształcił się w przestrzeń. Dzisiejszy wszechświat odpowiada kolistemu brzegowi. Gdybym był w stanie narysować

wszystkie cztery duże wymiary, jednowymiarowy okrąg brzegowy z ilustracji 57 stały się hipersferą, czyli trójwymiarową powierzchnią w czterowymiarowej czasoprzestrzeni, do której w zasadzie ograniczają się wszystkie nasze obserwacje wszechświata. Teraz, co najważniejsze, możemy zobaczyć, że w tym płaskim rzucie ekspansja oznacza, iż większość objętości czasoprzestrzeni, która tworzy naszą przeszłość, jest ściśnięta w kierunku krawędzi dysku. W wyniku tego ogromna większość gwiazd i galaktyk jest spiętrzona w pobliżu powierzchni brzegowej. Czy ma to sens? Ma! Zastępując gwiazdy i galaktyki aniołami i demonami, dysk na ilustracji 57 płynnie przemienia się w Escherowski rzut przestrzeni AdS przedstawiony na ilustracji 55.

Właśnie o takie połączenie chodziło Stephenowi. Klasyczna przestrzeń AdS zupełnie nie przypomina rozszerzającego się wszechświata. Jednak z półklasycznej perspektywy, przechodząc do czasu urojonego, widzimy, że te dwa kształty przestrzeni są ze sobą w istocie ściśle powiązane. W półklasycznym ujęciu AdS i jej desitterowe przeciwieństwo mogą być traktowane jak dyski Escherowskie z większą częścią ich wewnętrznej objętości spiętrzoną w pobliżu sferycznej powierzchni brzegowej. Stephen uważał, że półklasyczne myślenie o grawitacji i czasoprzestrzeni w pewnym sensie jednoczy model AdS i jego przeciwieństwo. *To tak, jakby znak λ nie miał realnego znaczenia w królestwie grawitacji kwantowej.*

To spostrzeżenie utorowało drogę do holograficznej dualności dS-QFT. Podobnie jak w przypadku AdS kolista powierzchnia brzegowa na ilustracji 57 zapewnia naturalne ramy dla holograficznego opisu rozszerzającego się wszechświata. Biorąc pod uwagę te podobieństwa, dualne pola i cząstki na tej powierzchni mogą w istocie mieć wiele wspólnych cech z hologramami AdS¹⁴. Fizycy starają się zrozumieć, w jaki sposób, dopracowując szczegóły w holograficznych światach powierzchni, można wygenerować albo pozbawioną życia przestrzeń AdS, albo wszechświat, który się rozszerza

i rodzi galaktyki i życie. *Wszechświat mimo wszystko może mieć brzeg* — żartował Stephen.



II. 57. Aby uwzględnić jego kwantowe pochodzenie, wczesny Stephen w latach osiemdziesiątych rozważał wszechświat w czasie urojonym. W tym ujęciu wszystkie wymiary zachowują się jak kierunki przestrzeni, z których dwa pokazano tutaj. Początek wszechświata znajduje się w środku dysku i rozszerza się na zewnątrz wzdłuż kierunku radialnego (czas urojony). Dzisiejszy wszechświat odpowiada kolistemu brzegowi dysku. Późniejszy Hawking poszedł jednak dalej, znacznie dalej, i przeniósł nas od czasu urojonego do zupełnego braku czasu. Wykorzystując holograficzne właściwości grawitacji, zaczęliśmy wyobrażać sobie brzeg dysku jako hologram składający się ze splątanych kubitów, z którego rzutowana jest czasoprzestrzeń wnętrza — nasza przeszłość. Kosmologia holograficzna

zawiera perspektywę odgórną, w której przeszłość jest w pewnym sensie zależna od teraźniejszości.

Podstawowa różnica między hologramami odzwierciedlającymi wnętrza AdS a opisującymi wszechświaty inflacyjne polega na charakterze pojawiającego się dodatkowego wymiaru. W pierwszym przypadku wyłaniający się kierunek jest zakrzywionym wymiarem przestrzeni. To wewnętrzna głębia AdS. W przypadku rozszerzającego się wszechświata wyłania się wymiar czasu. Oznacza to, że **s a m a h i s t o r i a j e s t z a p i s a n a h o l o g r a f i c z n i e**. I to może się okazać najbardziej oszałamiającym hasłem w słowniku holograficznym!

Może to teraz brzmieć szokująco. Jednak pogląd, że czas i ekspansja kosmologiczna są emergentnymi cechami wszechświata, jest naturalną kontynuacją ciągu spostrzeżeń dotyczących pochodzenia czasu, które napotkaliśmy podczas naszej podróży. Kiedy Georges Lemaître po raz pierwszy przedstawił ideę kwantowego pochodzenia wszechświata, myślał już o tym, że czas może być emergentny: „Czas nabiera sensownego znaczenia dopiero wtedy, gdy pierwotny kwant zostanie podzielony na wystarczającą liczbę kwantów”¹⁵. Pięćdziesiąt lat później Jim i Stephen w opisie pochodzenia wszechświata pozbawionego brzegów potwierdzili intuicję Lemaître’a poprzez postulat, że czas przekształca się w przestrzeń, gdy zbliżamy się do początku. Holograficzne wcielenie ich teorii przedstawione na ilustracji 57 prowadzi nas jeszcze dalej w ponadczasowość. Uwzględniając grawitację i ewolucję kosmologiczną w mnóstwie oddziaływań kwantowych ograniczonych do trójwymiarowej powierzchni, holografia całkowicie porzuca wszelkie wcześniejsze pojęcie czasu. W holograficznym wszechświecie czas byłby w pewnym sensie iluzoryczny. To sprawia, że pierwotny postulat braku brzegów wygląda w istocie dość konserwatywnie.

Cóż to była za niezwykła podróż od newtonowskiego czasu absolutnego do czasu bez czasu! Niemniej myślenie o upływie czasu jako rzucie

holograficznym wciąż wydaje się obce nawet dla fizyków teoretyków. Spodziewam się, że minie jeszcze wiele lat, zanim fizycy będą w stanie rozszyfrować rodzaj hologramów zawierających historie chwiejnej ekspansji „niezdecydowanych” wszechświatów takich jak nasz. Niezliczone zawile matematyczne subtelności, bardzo interesujące same w sobie, będą zajmować fizyków przez długi czas. Nie powinniśmy oczekiwać, że pewnego dnia holografia będzie wymagać od nas przepisania standardowych podręczników kosmologii. Wynika to zwłaszcza stąd, że geometryczny język Einsteina sprawdza się doskonale jako sposób opisu większości wielkoskalowego wszechświata. Możemy zarazem oczekiwać, że holografia stanie się niezwykle ważna tam, gdzie teoria Einsteina zawodzi — wewnątrz czarnych dziur i szczególnie podczas Wielkiego Wybuchu. W końcu taka jest natura — i moc — dualności holograficznych. Szczególnie fascynującą możliwością jest to, że holograficzne podstawy czasoprzestrzeni mogły mieć kluczowe znaczenie podczas inflacji i że subtelne ślady tego zjawiska w fluktuacjach mikrofalowego promieniowania tła mogą być wykrywalne w przyszłych obserwacjach fal grawitacyjnych. Czas pokaże!

Na poziomie pojęciowym holografia pieczętuje odgórne podejście do kosmologii. Główna zasada kosmologii holograficznej — że przeszłość stanowi rzut sieci splątanych ze sobą cząstek kwantowych, które tworzą hologram o mniejszej liczbie wymiarów — **i m p l i k u j e** odgórny pogląd na wszechświat. Jeśli, jak zakłada kosmologia holograficzna, powierzchnia naszych obserwacji jest w pewnym sensie wszystkim, co istnieje, to wbudowuje się to w działanie wstecz w czasie, które jest znakiem rozpoznawczym kosmologii odgórnej. Holografia mówi nam, że istnieje bardziej podstawowy byt niż czas — hologram — z którego wyłania się przeszłość. Ewoluujący i rozszerzający się wszechświat byłby wynikiem, a nie warunkiem w holograficznym wszechświecie.

W półklasycznym myśleniu Stephena o kosmologii kwantowej trzy filary

odgórnego tryptyku — początek, ewolucja i obserwowalność — były ze sobą jedynie luźno splecione. Chociaż istniała ścisła współzależność między wszystkimi trzema elementami, pozostały one pojęciowo odrębnymi bytami. W rezultacie pojawiły się wątpliwości, czy te trzy składniki mogą — a nawet muszą — zostać naprawdę połączone, czy podejście odgórne rzeczywiście było fundamentalną zmianą, którą ogłosił Stephen. Lecz architektura holograficznej kosmologii dowodzi, że Stephen miał rację. Holografia zacieśnia odgórny tryptyk w jednolity węzeł, który stanowi prawdziwie nowe ramy przewidywania. Po pierwsze, pozbywając się czasu z naszej listy podstawowych zjawisk, łączy ze sobą dynamikę i warunki brzegowe. Po drugie, dając pierwszeństwo splątaniu holograficznemu przed czasoprzestrzenią, obejmuje obserwowalność. Poza tym matematyka stojąca za kosmologią holograficzną uwzględnia tę syntezę w jednym zunifikowanym równaniu, którego wstępnej wersji można się doszukać na tablicy za Stephenem przedstawionej na fotografii 11 na wklejce. To rzeczywiście osadza myślenie odgórne na twardszym gruncie.

Kładąc nacisk na splątanie, holografia umieszcza zdolność układów do przechowywania i przetwarzania informacji w centrum tego ściśle połączonego tryptyku. Holografia zakłada, że fizyczna rzeczywistość nie składa się tylko z realnych obiektów, takich jak cząstki materii i promieniowania, czy nawet pole czasoprzestrzeni, ale zawiera też znacznie bardziej abstrakcyjny byt: informację kwantową. To powołuje na nowo do życia inny ze śmiałych i pozornie nietrafionych pomysłów Wheelera. On również lubił traktować rzeczywistość fizyczną jako pewnego rodzaju obiekt informacyjno-teoretyczny, który nazwał „bytem z bitu”. Wheeler utrzymywał, że świat fizyczny ostatecznie wywodzi swoje istnienie z bitów informacji, które tworzą nieredukowalny rdzeń w samym sercu rzeczywistości. „Każdy obiekt fizyczny, każdy «byt» — pisał — wywodzi swoje znaczenie z «bitów», binarnych jednostek informacji przyjmujących wartość tak lub nie”¹⁶.

Trzydzieści lat później holografia realizuje wizję Wheelera dzięki kubitom,

podstawowym jednostkom informacji kwantowej (i z kilkoma nadal nieusuniętymi warstwami szaleństwa). Według dualności dS-QFT informacja kwantowa wpisana w abstrakcyjny, ponadczasowy hologram splątanych kubitów tworzy nić tkającą rzeczywistość. Jeśli usuniemy splątanie na powierzchni brzegowej, nasza wewnętrzna czasoprzestrzeń po prostu się rozpadnie.

W przeciwieństwie do binarnych bitów zwykłej informacji przyjmujących wartość zero lub jeden kubity zbudowane są z cząstek kwantowych, które mogą się znajdować w superpozycji zera i jedynki jednocześnie. Kiedy poszczególne kubity oddziałują, ich możliwe stany zostają splątane, a prawdopodobieństwo przyjęcia przez każdy z nich wartości zero i jeden zależy od drugiego. Splątanie oznacza, że jeśli mierzymy kubity, możemy również dowiedzieć się czegoś o ich splątanych partnerach, nawet jeśli są bardzo daleko. Oczywiście splątanie w coraz większej liczbie kubitów wykładniczo zwiększa liczbę jednoczesnych możliwości i to właśnie sprawia, że w teorii komputery kwantowe są tak potężne. Rozproszony sposób, w jaki splątanie kwantowe może przechowywać informacje, pomaga zrekompensować fakt, że poszczególne kubity są nieustannie podatne na błędy, co stanowi główne wyzwanie przy konstruowaniu komputerów kwantowych. Najśłabsze pole magnetyczne lub impuls elektromagnetyczny może spowodować przestawienie kubitów i zaburzenie obliczeń. Tak więc inżynierowie kwantowi lubią pracować z przestrzennie odseparowanymi splątanymi kubitami i opracowują wyspecjalizowane techniki, które wykorzystują nadmiarowość, aby chronić informacje kwantowe, nawet gdy pojedyncze kubity ulegną uszkodzeniu. To właśnie wysiłki mające na celu zaprojektowanie programów do korekcji błędów, które poradzą sobie ze zniechęcającymi wskaźnikami błędów fizycznych kubitów, są jednym z głównych impulsów w wyścigu o zbudowanie komputera kwantowego.

To naprawdę niesamowity zbieg okoliczności, że w tym samym czasie, w następstwie rewolucji holograficznej ogarniającej fizykę teoretyczną,

teoretycy strun zaczęli opracowywać własne programy kwantowej korekcji błędów — aby stworzyć czasoprzestrzeń! W rzeczywistości sposób rzutowania czasoprzestrzeni wewnętrzna w dualnościach holograficznych przypomina raczej wysoce wydajny kwantowy program do korekcji błędów. To mogłoby wyjaśniać, w jaki sposób czasoprzestrzeń zyskuje swoją wewnętrzną stabilność, mimo że jest utkana z tak delikatnego tworzywa kwantowego. Niektórzy teoretycy posunęli się nawet do stwierdzenia, że czasoprzestrzeń **j e s t** kodem kwantowym. Traktują hologram o mniejszej liczbie wymiarów jako pewnego rodzaju kod źródłowy działający na ogromnej sieci wzajemnie połączonych cząstek kwantowych przetwarzających informacje i w ten sposób generujących grawitację oraz wszystkie inne znane zjawiska fizyczne. Ich zdaniem wszechświat byłby rodzajem kwantowego procesora informacji, która to wizja wydaje się niemal identyczna z koncepcją, że żyjemy w symulacji.

Holografia maluje wszechświat, który jest nieustannie tworzony. To tak, jakby istniał kod działający na niezliczonych splątanych kubitach, który powoduje pojawienie się fizycznej rzeczywistości i to właśnie postrzegamy jako upływ czasu. W tym sensie holografia umieszcza prawdziwy początek wszechświata w odległej przyszłości, ponieważ tylko daleka przyszłość może odsłonić hologram w pełnej krasie.

A co z odległą przeszłością? Jak ponadczasowa kosmologia wyobraża sobie pochodzenie czasu? Załóżmy, że teoretycy odkrywają hologram odpowiadający naszemu rozszerzającemu się wszechświatowi i zabieramy się do jego odczytywania ze słownikiem AdS-QFT w rękę, cofając się w czasie. Co znaleźlibyśmy na samym dnie czasoprzestrzeni?

Można się zapuścić w przeszłość w kosmologii holograficznej, przyjmując coś na kształt rozmytego punktu widzenia na hologram. Przypomina to oddalanie się od obrazu. Pamiętajmy, że w dualności Maldaceny przenosimy się głębiej do wnętrza AdS, rozważając większe skale hologramu

powierzchniowego. Obiekty znajdujące się w samym centrum AdS są holograficznie zapisane jako korelacje dalekiego zasięgu na całym hologramie. Podobnie hologram rozszerzającego się wszechświata koduje odległą przeszłość w kubitach splątanych na dużych odległościach w świecie powierzchniowym. Przenosimy się dalej w przeszłość — w kierunku środka dysku na ilustracji 57 — usuwając z hologramu kolejne warstwy informacji, aż zostaje nam tylko kilka splątanych na odległość kubitów. Z holograficznego punktu widzenia najwcześniejsze momenty wszechświata są zdecydowanie najbardziej niesamowitym działaniem ze wszystkich. Aż w końcu zabraknie splątanych kubitów. I to właśnie byłby początek czasu¹⁷.

Wczesny (oddolny) Hawking traktował postulat braku brzegów jako opis stworzenia wszechświata z niczego. W tamtych czasach Stephen starał się podać fundamentalnie przyczynowe wyjaśnienie powstania wszechświata: dlaczego, nie jak. Lecz holografia podsuwa bardziej radykalną interpretację jego teorii. Kosmologia holograficzna pokazuje, że przemiana czasu w przestrzeń zaproponowana przez Stephena tak naprawdę prowadzi do wniosku, że sama fizyka zanika, kiedy powracamy do Wielkiego Wybuchu. Hipoteza braku brzegów wyłania się z holografii nie tyle jako prawo początku, i bardziej jako początek prawa. Co zatem pozostaje z odwiecznego pytania o ostateczną przyczynę Wielkiego Wybuchu? Najwyraźniej traci ono sens. To nie prawa jako takie, lecz ich zdolność do zmiany i ewolucji odgrywałaby kluczową rolę.

To pojęcie kosmogenezy jako prawdziwie ostatecznej granicy, które wyłania się z kosmologii holograficznej, prowadzi do daleko idących wniosków dla kosmologii multiświata. Nie ma dowodu na istnienie mozaiki wszechświatów w którymkolwiek z hologramów wymyślonych przez fizyków. Wręcz przeciwnie, holograficznie zapisane funkcje falowe wnętrza wydają się obejmować tylko bardzo mały skrawek krajobrazu strun: *Kosmologia holograficzna wycina multiświat niczym brzytwa Ockhama* — podsumował

Stephen¹⁸. Przez kilka ostatnich lat życia pozostawał całkowicie przekonany, że szaleństwo multiświata jest wytworem „klasycznego myślenia oddolnego zaplatającego się w supły”.

Multiświat pod wieloma względami stanowi kosmologiczną analogię (pół)klasycznej teorii czarnych dziur. Ta ostatnia nie określa górnej granicy ilości informacji, które mogą przechowywać czarne dziury. Podobnie kosmologia multiświata zakłada, że nasze teorie kosmologiczne mogą zawierać dowolnie dużą ilość informacji bez wpływu na opisywany przez nie kosmos.

Tymczasem kosmologia holograficzna odmalowuje radykalnie odmienny obraz. Kosmiczny gobelin wszechświatów wyspowych rozciągający się na wszystkie zakątki krajobrazu teorii strun wydaje się gubić swą wyrazistość w holograficznej kosmologii. Zamiast traktować go jako faktyczną nadbudowę fizyczną, ten krajobraz można rozumieć jako sferę matematyczną, która może wpływać na fizykę, ale niekoniecznie istnieje sama w sobie, podobnie jak tablica Mendelejewa w chemii. *Pytanie, co znajduje się poza naszym wszechświatem, brzmiałoby jak pytanie, przez którą szczelinę przechodzi elektron w eksperymencie z dwiema szczelinami* — stwierdził Stephen. Żyjemy na skrawku czasoprzestrzeni, otoczeni oceanem niepewności, o którym, no cóż, nie możemy nic powiedzieć.

Pod koniec naszej podróży spotkałem przypadkiem na konferencji Lindego i zapytałem go, co po dwudziestu latach myśli o multiświecie. Ku mojemu zdziwieniu Andrei powiedział, że jego zdaniem zrozumienie multiświata wymagałoby przyjęcia czysto kwantowego spojrzenia na rolę obserwatorów w kosmologii. Czy myślał tak przez cały czas? Oczywiście, że nie. Nauka jest tym, czym zajmują się naukowcy. Posuwamy się naprzód, wymieniając idee, dzięki dyskusjom i rozumowaniu, na podstawie dostępnych dowodów i abstrakcji. Potrzeba było głębokich paradoksów multiświata, aby bardziej uwypuklić ograniczenia istniejącego paradygmatu w fizyce, który pochodzi jeszcze od Newtona. Praca Lindego zainspirowała nas do znalezienia

szczeliny, przez którą można było wprowadzić kwantowość. Bez tych niezwykle irytujących i trudnych zagadek, którymi zaskakiwała nas teoria multiświata, prawdopodobnie nadal byłibyśmy gdzieś tam, poszukując widoku znikąd, zagubieni i zdezorientowani w nicości poza przestrzenią i czasem.

Stephen uchylił rąbka naszego wyzwania postawionego multiświatu w listopadzie 2016 roku podczas sesji kosmologicznej w siedzibie Papieskiej Akademii Nauk poświęconej pamięci Georges'a Lemaître'a. Nie byłem zaskoczony, gdy powiedział mi, że bardzo chciałby wziąć udział w tym spotkaniu. To właśnie w Watykanie w 1981 roku Stephen po raz pierwszy zaproponował koncepcję, że wszechświat nie ma brzegów. Wywróciwszy historię wszechświata do góry nogami, musiał się poczuwać w obowiązku do przedstawienia Akademii swojego aktualnego stanowiska w kwestii tematu, który był najbliższy jego sercu przez tyle lat.

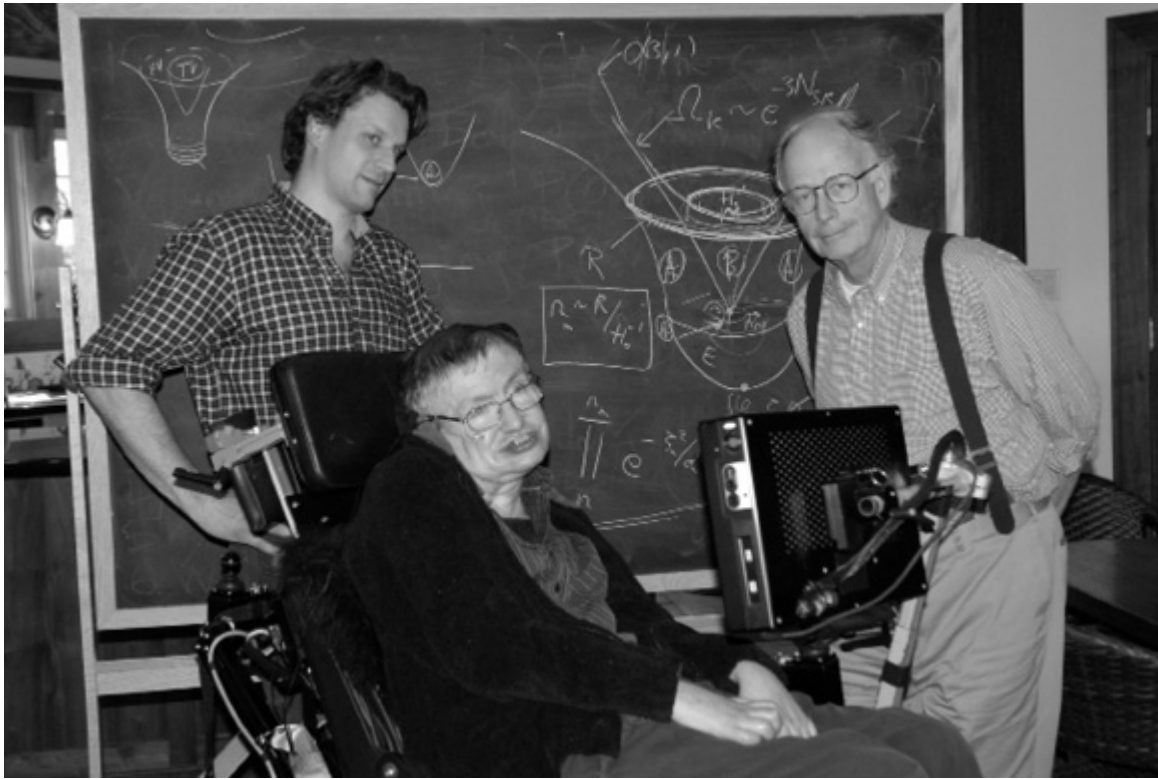
Była to ostatnia zagraniczna podróż Stephena, która przerodziła się w pełną trudów wyprawę. Lekarze Hawkinga nie pozwalali mu już latać odrzutowcami jego przyjaciół. Zamiast tego musiał zostać przewieziony ambulansem lotniczym, ale nie pierwszym lepszym, lecz należącym do pewnej firmy szwajcarskiej. Było to kosztowne przedsięwzięcie, a ponieważ Papieskiej Akademii Nauk brakowało funduszy, musieliśmy znaleźć możliwość finansowania z naszych grantów badawczych, które pokrywają tylko najpotrzebniejsze wydatki. Kiedy jego lekarze nadal nie chcieli się zgodzić na tę podróż, Stephen poinformował ich, że ma zaplanowane spotkanie z papieżem Franciszkiem. Postanowili więc nie przeszkadzać perspektywie świątobliwej audiencji (choć znając Stephena, mogli traktować to tłumaczenie nieco podejrzliwie) i Stephen mógł polecieć do Rzymu.

I tak się złożyło, że trzydzieści pięć lat po swoim pierwszym przemówieniu w Watykanie Stephen ponownie znalazł się w siedzibie Papieskiej Akademii Nauk za bazyliką św. Piotra, gdzie wyjaśnił, że istnieje dualny opis kosmosu, zupełnie inny i głęboko nieintuicyjny sposób patrzenia na rzeczywistość,

w którym rozszerzanie przestrzeni — jak również samego czasu — jest wyraźnie emergentnym zjawiskiem złożonym z niezliczonych kwantowych nici tworzących ponadczasowy świat leżący na powierzchni o mniejszej liczbie wymiarów. *Mimo wszystko wszechświat może mieć brzeg*¹⁹.

Kilka tygodni przed śmiercią odwiedziłem Stephena w jego domu. Był wówczas niemal odcięty od świata, ale otoczony najlepszą możliwą opieką. Wiedział, że wkrótce umrze. W jego gabinecie w Wordsworth Grove spotkaliśmy się po raz ostatni. *Nigdy nie byłem fanem multiświata* — mozolnie układał zdanie, a ja przecież doskonale zdawałem sobie z tego sprawę. *Czas na nową książkę... też o holografii* — to jego ostatnie słowa skierowane do mnie — moje ostatnie zadanie domowe. Moim zdaniem Stephen uważał, iż nowa holograficzna perspektywa wszechświata w końcu sprawi, że nasze odgórne podejście do kosmologii wyda się oczywiste i że pewnego dnia będziemy się zastanawiać, jak mogliśmy go nie dostrzec przez tak długi czas.

Padł gęsty śnieg, jak gdyby natura chciała usłać Stephenowi kobierzec na jego ostatnią podróż. Wracając do koledżu przez Maltings Lane i Coe Fen, przez Cam i obok The Mill, a następnie okrążając dawny DAMTP, rozmyślałem o naszej podróży. W naszych poszukiwaniach ostatecznych podstaw rzeczywistości, w ramach osobliwej pętli wzajemnych powiązań powróciliśmy do naszych własnych obserwacji. „To dzięki nam wszechświat może poznać samego siebie” — powiedział kiedyś Carl Sagan. Ale wydaje mi się, że we wszechświecie kwantowym — naszym wszechświecie — zaczynamy poznawać też samych siebie. Kosmologia odgórna — w formie holograficznej lub innej — jest zakorzeniona w naszej relacji z wszechświatem. Jest w tym subtelnie ludzki aspekt. I przy wielu okazjach miałem silne wrażenie, że przejście od boskiej do mrówczej wizji kosmosu rzeczywiście było dla Stephena Hawkinga jak powrót do domu.



II. 58. Z Jimem Hartle'em w Cook's Branch w Teksasie podczas pracy nad naszą ostateczną teorią.

¹ „Brane New World” rozpoczął się, gdy wiosną 1999 roku Stephen wrócił do Cambridge ze Stanów Zjednoczonych. Wjechał do naszego gabinetu i oznajmił, że trzeba napisać artykuł i, parafrazując Mirandę z *Burzy*, że powinien nosić tytuł *Nowy świat bran*, zostawiając nas chwilowo w niepewności, o czym dokładnie ma być ta publikacja. Kluczowym pytaniem w tamtym czasie było, czy wszechświaty membranowe z niewidocznym czwartym wymiarem przestrzennym mogą się wyłonić z jakiegoś rodzaju początku w Wielkim Wybuchu. Artykuł *Brane New World*, który opublikowaliśmy w „Physical Review” D 62 (2000) 043501, ostatecznie pokazał, że w propozycji Stephena dotyczącej pochodzenia wszechświata bez brzegów takie (mem)branowe światy mogą powstać z niczego, w procesie kwantowej kreacji. Co więcej, odkryliśmy, że dodatkowy wymiar prostopadły do membrany, chociaż nie możemy go bezpośrednio obserwować, może pozostawić subtelny ślad we fluktuacjach kosmicznego mikrofalowego promieniowania tła wewnątrz membrany, dając nadzieję, że pewnego dnia będziemy mogli pośrednio przetestować, czy żyjemy w świecie bran.

² Książki Stephena często zawierały niektóre z jego najnowszych badań. Jego teoria braku brzegów z 1983 roku była najważniejszym punktem *Krótkiej historii czasu*, a nasze pierwsze ogórne pomysły pojawiły się w *Wielkim projekcie* z 2010 roku. Artykuł *Brane New World* stanowił inspirację dla ostatniego rozdziału *Wszechświata w skorupce orzecha*,

w którym Stephen porównał narodziny wszechświatów membranowych do tworzenia pęcherzyków pary we wrzącej wodzie. To przechodzenie między badaniami a pisarstwem popularnonaukowym było kluczowe dla jego praktyki naukowej i, jak sądzę, odzwierciedla jego głębokie przekonanie, że nauka, w tym nowe przełomowe spostrzeżenia, powinna być częścią naszej kultury, jeśli ma zmienić świat na lepsze. Wszystko to sprawiło, że wcale nie byłem zaskoczony, gdy na krótko przed śmiercią Stephen powiedział mi, że nadszedł czas na nową książkę — tę książkę.

³ Stephen W. Hawking, Thomas Hertog, *A Smooth Exit from Eternal Inflation?* „Journal of High Energy Physics” 4 (2018), s. 147.

⁴ Nie jest to jedyny wzór, który można znaleźć w Westminsterze. W nawie opactwa westminsterskiego w pobliżu grobowca Newtona znajduje się płyta upamiętniająca Paula Diraca. Napis na niej zawiera „równanie Diraca”: $i\gamma \cdot \delta\psi = m\psi$, opisujące kwantowe zachowanie elektronu. Pewnego razu, kiedy odwiedziłem opactwo ze Stephenem, pozwolił sobie na uwagę: „Najwyraźniej Bóg był czystym matematykiem”.

⁵ Stephen W. Hawking, *Breakdown of Predictability in Gravitational Collapse*, „Physical Review” D 14 (1976), s. 2460.

⁶ Można oczywiście uznać, że półklasyczne metody Hawkinga nie są odpowiednie do analizowania sposobu ucieczki informacji z parującej czarnej dziury. W końcu czarne dziury kryją w sobie osobliwość, w której teoria półklasyczna załamuje się. Jednak Don Page z Uniwersytetu Alaberty wyjaśnił, że zagadka informacyjna dotyczy nie tyle tego, co się dzieje pod koniec życia czarnej dziury, kiedy do gry w oczywisty sposób wchodzi osobliwość, ile tego, co się dokonuje na długiej drodze do niej. Page przeprowadził własny eksperyment myślowy, w którym badał całkowity stopień splątania kwantowego między wnętrzem czarnej dziury a promieniowaniem Hawkinga na zewnątrz. Opisuje się to wielkością znaną jako entropia splątania — kwantową wersją entropii wymyślonej przez matematyka Johna von Neumanna, która mierzy brak dokładnej informacji o funkcji falowej układu kwantowego. Na początku procesu parowania entropia splątania jest oczywiście zerowa, ponieważ czarna dziura nie wyemitowała jeszcze żadnego promieniowania, z którym mogłaby się splątać. Gdy promieniowanie Hawkinga wydostaje się na zewnątrz, entropia splątania między dziurą a promieniowaniem rośnie, ponieważ emitowane cząstki są splątane ze swoimi partnerami za horyzontem. Page uważał, że jeśli informacja ma być zachowana, ten trend powinien się w pewnym momencie odwrócić, tak aby entropia splątania ponownie wynosiła zero na końcu, gdy nie ma już czarnej dziury. Doszedł do wniosku, że z biegiem czasu entropia splątania powinna podążać wzdłuż krzywej w kształcie odwróconego V, z punktem przejścia mniej więcej w połowie procesu parowania. Ponieważ w tym momencie czarna dziura wciąż jest duża i makroskopowa, półklasyczny model Stephena nadal powinien działać, gdyż nie ma powodu, dla którego miałyby się załamywać w środowisku o stosunkowo niewielkiej krzywiznie w pobliżu horyzontu dużej czarnej dziury. Jednak w półklasycznych obliczeniach Hawkinga nie ma sposobu na przegięcie krzywej entropii splątania. To jeszcze bardziej uwypukla ten

paradoks. Założenie, że domniemane efekty grawitacji kwantowej mogłyby spowodować uwolnienie wszystkich informacji, nagle wydaje się mniej prawdopodobne. Udoskonalenie przez Page'a eksperymentu myślowego Hawkinga pokazuje, że problem informacji w czarnych dziurach jest paradoksem w ramach półklasycznej struktury grawitacji. Page opublikował swoją analizę: *Average entropy of a subsystem*, „Physical Review Letters” 71 (1993), s. 1291.

⁷ Stephen W. Hawking, *Black holes ain't as black as they are painted*, The Reith Lectures, BBC, 2015.

⁸ Edward Witten, *Duality, Spacetime and Quantum Mechanics*, „Physics Today” 50, 5, 28 (1997).

⁹ Maldacena odkrył swoją dualność holograficzną, rozważając z dwóch różnych perspektyw właściwości ciasno ułożonego zbioru trójwymiarowych membran, które teoretycy nazywają trójbranami. Wcześniej bystry teoretyk Joe Polchinski zdał sobie sprawę, że takie brany w M-teorii są szczególnymi miejscami, do których są przyłączone końce strun tworzących „cząstki” materii. Struny mogą się swobodnie poruszać przez brany, ale nie mogą ich opuszczać. Jedynym wyjątkiem od tej reguły są struny odpowiedzialne za grawitację, ponieważ są to zamknięte pętle bez punktów końcowych, więc brany nie mogą ich uwięzić. Fizycznie oznacza to, że w teorii strun grawitacja siłą rzeczy wycieka z bran, rozchodząc się we wszystkich wymiarach przestrzennych, podczas gdy materię można uwięzić na branach. Tymczasem patrząc z wewnętrznej perspektywy, która pozwala obserwować dynamikę strun poruszających się przez brany, Maldacena odkrył, że stos trójbran jest opisany przez kwantową teorię pola działającą w trzech wymiarach przestrzennych — trzech wymiarach tworzących trójbranę. Następnie rozważył dokładnie ten sam stos trójbran z zewnętrznego punktu widzenia, przyglądając się, jak ten stos jako całość wpływa na otoczenie. Patrząc na stos w ten sposób, Maldacena odkrył, że jest to w zasadzie układ grawitacyjny. Brany mają masę i energię, dlatego uginają czasoprzestrzeń w swoim sąsiedztwie. Ponadto zakrzywiona czasoprzestrzeń generowana przez brany okazuje się rozciągać w dodatkowym kierunku prostopadłym do bran o kształcie przestrzeni AdS. Obie perspektywy wydają się radykalnie różne. Jednak, rozumował Maldacena, skoro opisują jeden i ten sam układ fizyczny, ostatecznie powinny być takie same. Oznacza to, że powinny być do siebie dualne. W ten sposób Maldacena doszedł do dualności holograficznej, łącząc teorię grawitacji i strun w zakrzywionej przestrzeni AdS z kwantową teorią pola (QFT) na powierzchni brzegowej. Maldacena opublikował swoją niezwykłą analizę w artykule *The Large N limit of superconformal field theories and supergravity*, „Advances in Theoretical and Mathematical Physics” 2 (1998), s. 231–252.

¹⁰ Ogólna idea, że grawitacyjna strona dualności holograficznej obejmuje sumę geometrii wewnętrznych, sięga początków tej dualności. Kiedy Witten po raz pierwszy zaproponował, że czarne dziury we wszechświecie AdS mają dualny opis w postaci gorącej kąpieli kwarków i gluonów poruszających się swobodnie w świecie brzegu, zauważył również, że w jego obliczeniach znajduje się druga wewnętrzna geometria bez pojawiającej się czarnej

dziury. Kiedy zupa kwarkowa jest gorąca, wewnątrz bez czarnej dziury było ukryte. Kiedy jednak Witten obniżył temperaturę zupy cząstek (w ramach eksperymentu myślowego!), zauważył, że zmienił się jej skład, kwarki połączyły się i utworzyły silnie związane cząstki złożone, takie jak protony czy neutrony. Po stronie grawitacji to przejście z wysokiej do niskiej temperatury odpowiada wewnątrz bez czarnej dziury, które zaczyna dominować geometrię wewnętrzną z czarną dziurą. Tak więc zmieniając temperaturę zupy cząstek na powierzchni brzegowej, jedna bądź druga geometria wychodzi na pierwszy plan we wnętrzu, co stanowi żywą ilustrację Feynmanowskiej superpozycji czasoprzestrzeni. Witten opublikował swoją analizę w pracy *Anti-de Sitter space, thermal phase transition, and confinement in gauge theories*, „Advances in Theoretical and Mathematical Physics” 2 (1998), s. 253.

¹¹ Stephen W. Hawking, *Information Loss in Black Holes*, „Physical Review” D 72 (2005), s. 084013.

¹² Geoffrey Penington, *Entanglement Wedge Reconstruction and the Information Paradox*, „Journal of High-Energy Physics” 09 (2020), s. 002; Geoff Penington, Stephen H. Shenker, Douglas Stanford, *Replica wormholes and the black hole interior*, „JHEP” 03 (2022), s. 205; Ahmed Almheiri, Netta Engelhardt, Donald Marolf, Henry Maxfield, *The entropy of bulk quantum fields and the entanglement wedge of an evaporating black hole*, „JHEP” 12 (2019), s. 063.

¹³ Rysunek z pracy John Archibald Wheeler, *Geons*, „Physical Review” 97 (1955), s. 511–536.

¹⁴ Przez lata bardzo wielu teoretyków przyczyniło się do rozwoju dualności holograficznej dla rozszerzających się wszechświatów, takich jak przestrzeń de Sittera, w ramach zbiorowego wysiłku, który trwa do dziś. Pierwsze opublikowane rozważania na temat dualności dS-QFT sięgają początku XXI wieku i obejmują prace Andrew Stromingera oraz Vijaya Balasubramana, Jana de Boera i Djordje Minica. Perspektywa funkcji falowej wszechświata dotycząca tej dualności została zapoczątkowana w artykułach naukowych, takich jak *Non-Gaussian features of primordial fluctuations in single field inflationary models* autorstwa Maldaceny („Journal of High-Energy Physics” 05 (2003), s. 013); *Holographic No-Boundary Measure* Hartle’a i Hertoga („Journal of High-Energy Physics” 05 (2012), s. 095) oraz w *Wave function of Vasiliev’s universe: A few slices thereof* autorstwa Dionysiosa Anninos, Frederika Denefa i Daniela Harlowa („Physical Review” D 88 (2013), s. 084049).

¹⁵ Lemaître, *The beginning of the world*, op. cit.

¹⁶ John Archibald Wheeler, *Information, Physics, Quantum: The Search for Links*, w: *Proceedings III International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics*, red. Shun’ichi Kobayashi (Tokyo: Physical Society of Japan, 1990), s. 354–358.

¹⁷ Fala braku brzegów zmierza do zera na dnie czasowatych geometrii, które opisują pochodzenie wszechświata. Była to jedna z cech definiujących teorię, kiedy Jim i Stephen

po raz pierwszy ją zaproponowali. Holografia daje informacyjno-teoretyczną interpretację tej cechy.

¹⁸ Stephen odwoływał się tutaj do zasady filozoficznej często przypisywanej trzynastowiecznemu angielskiemu filozofowi Williamowi z Ockham, mówiącej o tym, że „nie należy mnożyć bytów ponad potrzebę”.

¹⁹ S.W. Hawking, *The Origin of the Universe*, w: *Proceedings of the Plenary Session, 25–29 November 2016*, red. W. Arber, J. von Braun, M. Sánchez Sorondo (Vatican City, 2020), Acta 24.

ROZDZIAŁ 8

U siebie we wszechświecie

The fabric of existence weaves itself whole.

Tkanina istnienia splata się w całość.

CHARLES IVES

W 1963 roku Hannah Arendt wzięła udział w zorganizowanym przez redakcję „Great Ideas Today” konkursie Sympozjum Kosmosu na esej. Było to tuż po pierwszych lotach człowieka w kosmos i podczas planowania przez NASA misji księżycowej Apollo 11. Arendt zadano pytanie: „Czy podbój kosmosu zwiększył czy zmniejszył rangę człowieka?”. Pozornie oczywista odpowiedź powinna brzmieć, że bez wątpienia ją zwiększył. Arendt jednak nie podzielała tego poglądu.

W swoim esej *Podbój kosmosu i ranga człowieka* zastanawiała się, jak nauka i technika zmieniają znaczenie człowieczeństwa¹. Kluczowym punktem jej koncepcji humanizmu była idea wolności. Twierdziła, że swoboda działania i nadawania znaczenia jest tym, co pozwala nam być ludźmi². Arendt rozważała, czy ludzka wolność jest zagrożona, gdy zdobywamy coraz większą wiedzę potrzebną do przeprojektowania i kontrolowania świata, począwszy od naszego fizycznego środowiska i świata ożywionego, aż po naturę inteligencji.

Urodzona w niemiecko-żydowskiej rodzinie w 1906 roku w Hanowerze Hannah Arendt studiowała na Uniwersytecie w Marburgu u Martina Heideggera, ale podobnie jak Einstein została zmuszona do ucieczki z Niemiec w 1933 roku. Doświadczyła na własnej skórze, jak można ograniczyć ludzką wolność i godność. Przez następne osiem lat mieszkała

w Paryżu, po czym w 1941 roku wyemigrowała do Stanów Zjednoczonych, gdzie stała się częścią żywego kręgu intelektualnego Nowego Jorku. Później w swoim reportażu dla „The New Yorkera” z procesu o zbrodnie wojenne Adolfa Eichmanna w Jerozolimie w ważnych (lub oczywistych dla innych) słowach stwierdziła, że zwykli ludzie stają się bezwiednymi poplecznikami systemów totalitarnych, bo przestają samodzielnie (a nawet w ogóle) myśleć i odcinają się od świata. Tego rodzaju sytuacje w sferze społeczno-politycznej przypisywała społecznemu rozkładowi wywołanemu tym, co nazwała **alienacją ze świata**, utratą poczucia przynależności do świata i świadomości, że wszyscy jesteśmy ze sobą związani, że istnieje jedność ludzkości i że ten związek wymaga zaangażowania obywatelskiego.

Arendt wyraźnie czuła, że u podstaw wyobcowania człowieka ze świata leżą współczesna nauka i technologia. Właściwie jako głównego winowajcę wskazała kluczowe spostrzeżenie, które zapoczątkowało współczesną rewolucję naukową — ideę, że świat jest obiektywny. Od samego początku współczesna nauka poszukiwała wyższej prawdy rządzącej się racjonalnymi i uniwersalnymi prawami. W dążeniu do tego celu naukowcy ulegli czemuś, co Arendt nazwała **alienacją z Ziemi** (której nie należy mylić z alienacją ze świata), będącą poszukiwaniem perspektywy archimedesowej, z której spodziewają się uzyskać obiektywne zrozumienie.

Zdaniem Arendt takie stanowisko jest sprzeczne z humanizmem. Oczywiście podejście naukowe odniosło gigantyczny sukces, zarówno w obszarze teorii, jak i praktyki, a jego korzyści dla ludzkości są niezaprzeczone. Ale ucieczka od naszych ziemskich korzeni, która jest znakiem rozpoznawczym współczesnej nauki, doprowadziła również do rozdźwięku między naszymi ludzkimi celami a rzekomo obiektywnym działaniem natury. Arendt utrzymywała, że na przestrzeni niemal pięciu stuleci ten rozdźwięk powiększał się i coraz silniej rzucał wyzwanie ludzkiej naturze, zmieniając tkankę społeczną i powoli, choć nieprzerwanie przekształcając alienację z Ziemi — widok znikąd nieodłącznie związany

z większością nauki — w alienację ze świata, powszechne oderwanie od świata.

W swoim eseju Arendt porusza ten problem leżący w sercu współczesnej nauki i twierdzi, że ostatecznie okaże się to samoniszcącym paradygmatem. Co ciekawe, na poparcie swojej tezy cytuje słowa pioniera kwantowego Wernera Heisenberga, iż „człowiek, poszukując obiektywnej rzeczywistości, nagle odkrył, że zawsze mierzy się sam ze sobą”³. Heisenberg odniósł się tutaj do kluczowej roli obserwatora w teorii kwantowej, do faktu, że same zadawane pytania wpływają na to, jak objawia się rzeczywistość. Instrumentalistyczna interpretacja teorii, którą on i Bohr rozwinęli, a która uosabiała wczesną erę kwantową, stanowiła źródło głębokiej epistemologicznej zagadki. Fizykom kazano „zamknąć się i liczyć” i nie przejmować się ontologią teorii kwantowej. Lecz Arendt postąpiła na odwrót i dobitnie zauważyła, że wraz z pojawieniem się teorii kwantowej nauki ściśle dotarły do tego, co nauki humanistyczne wiedziały od początku, ale czego nigdy nie potrafiły udowodnić, a mianowicie, że humaniści mieli rację, martwiąc się o miejsce człowieka w nowym świecie nauki.

Dla Arendt wystrzelenie Sputnika, wydarzenie „pod względem wagi niemające sobie równych”, ucieleśniało ewolucję w kierunku całkowicie sztucznego świata, „technotopu” podlegającego ludzkiemu panowaniu i kontroli. W swoim eseju pisze: „Astronautę wystrzelonego w kosmos i uwięzionego w naszpikowanej technologią kapsule, gdzie każdy prawdziwie fizyczny kontakt z otoczeniem oznaczałby natychmiastową śmierć, można uznać za symboliczne wcielenie człowieka Heisenberga, który tym silniej będzie unikać kontaktu z innymi osobami i wytworami ludzkimi, im goręcej pragnie wyeliminować wszelkie antropocentryczne rozważania ze swojego spotkania z otaczającym go pozaludzkim światem”.

Dla Arendt ta pogoń za nauką i technologią pozbawiona wszelkich elementów antropomorficznych i trosk humanistycznych była zasadniczo błędna. Czy dotyczy to podboju kosmosu w nadziei na geoinżynierię innej

planety, czy pogoni za kamieniem filozoficznym w biotechnologii — czy też poszukiwania ostatecznej teorii w fizyce teoretycznej — były to dla niej akty buntu przeciwko naszej ludzkiej kondycji jako mieszkańców tej planety.

Człowiek z pewnością straci swoją przewagę. Jedyne, co może znaleźć, to punkt archimedesowy względem Ziemi, ale kiedy już tam się pojawi i uzyska absolutną władzę nad swoim ziemskim środowiskiem, będzie potrzebował nowego punktu archimedesowego i tak dalej w nieskończoność. Człowiek może jedynie zagubić się w bezmiarze wszechświata, bo jedynym prawdziwym punktem archimedesowym może być absolutna pustka poza wszechświatem.

Arendt uważała, że jeśli zaczniemy patrzeć z góry na świat i na nasze działania, jakbyśmy znajdowali się poza nim, jeśli zaczniemy sami się wywyższać, to nasze działania ostatecznie stracą swój głębszy sens. To dlatego, że zaczniemy postrzegać Ziemię jako obiekt jak każdy inny, a nie jako nasz dom. Nasze poczynania — od zakupów w sieci po działalność naukową — zostaną zredukowane do zwykłych punktów pomiarowych dających się analizować tymi samymi metodami, których używamy do badania zderzeń cząstek lub zachowania szczurów w laboratorium. Nasza duma z tego, co możemy osiągnąć, rozplynie się w mutację rasy ludzkiej, przekształcając nas z podmiotów czyniących sobie Ziemię poddaną w zwykłe przedmioty. Arendt kończy swój esej wnioskiem, że jeśli kiedykolwiek dotrzemy do tego punktu, „ranga człowieka nie zostanie jedynie obniżona wedle wszystkich znanych nam kryteriów, ale ulegnie zrujnowaniu”. Oznacza to, że stracimy naszą wolność. Przestaniemy być ludźmi.

Jest to paradoks. W ramach prób znalezienia ostatecznej prawdy i przejęcia absolutnej kontroli nad ludzką egzystencją na Ziemi ryzykujemy zmniejszenie, a nie zwiększenie naszego statusu.

U podstaw argumentacji Arendt leżała idea, że nauka i technologia mogą prawdziwie zwiększyć rangę człowieka tylko wtedy, gdy zapagniemy traktować wszechświat jako swój dom. „Ziemia jest kwintesencją kondycji ludzkiej” — napisała. Wszystko, czego dowiadujemy się o świecie lub co dla niego czynimy, pochodzi z ludzkich odkryć i starań. Bez względu na to, jak abstrakcyjne i pomysłowe są nasze myśli lub jak dalekosiężne jest ich oddziaływanie, nasze teorie i działania pozostają nierozzerwalnie splecione z naszymi ludzkimi, ziemskimi warunkami. I to dlatego Arendt opowiadała się za praktyką naukową i wizją technotopu zakorzenionymi w naszym człowieczeństwie:

Nowy światopogląd, który może się wyłonić ze współczesnej nauki, prawdopodobnie znów będzie geocentryczny i antropomorficzny. Nie w dawnym rozumieniu, gdzie Ziemia jest centrum wszechświata, a człowiek zajmuje najwyższe miejsce w hierarchii istnienia. Ale geocentryczny w tym sensie, że Ziemia, a nie punkt poza wszechświatem jest punktem centralnym i domem ludzkości. I antropomorficzny w tym sensie, że człowiek będzie traktować własną skończoność jako jeden z elementarnych warunków, dzięki którym jego wysiłki naukowe są w ogóle możliwe.

W tym właśnie miejscu Hannah i Stephen zgadzają się ze sobą. To znaczy późniejszy odgórny Stephen. Ostateczna teoria Hawkinga uwalnia kosmologię z jej platońskiego kaftana bezpieczeństwa. W pewnym sensie sprowadza prawa fizyczne z powrotem na właściwe miejsce. Przyjmując odwrotną perspektywę na wszechświat, teoria ta jest zakorzeniona w tym, co Arendt nazwała naszymi ziemskimi warunkami. Nie jest to jedynie zawyły problem akademicki, ponieważ kosmologia fizyczna uznająca skończoność tkwiącą w naszej mrówczej perspektywie z czasem zmieni orientację samego

programu naukowego. Jeśli rzeczywiście przeszłość może być przewodnikiem, to mamy prawo spodziewać się, że ostateczna teoria Hawkinga stanie się rdzeniem nowego światopoglądu naukowego i ludzkiego, w którym wiedza i kreatywność człowieka ponownie będą orbitować wokół wspólnego środka.

Kosmologia może też być jedyną dziedziną nauki, w której słusność obaw Hannah Arendt nie budzi wątpliwości. Oczywiście znajdujemy się wewnątrz wszechświata! Niemniej od czasów Newtona kosmolodzy starali się rozumować z punktu poza nim, a pod koniec XX wieku spekulacje dotyczące multiświata przekształciły alienację z Ziemi w **alienację ze wszechświata**. Zdezorientowani biofilną naturą rzekomo obiektywnych praw i zagubieni w multiświecie kosmolodzy znaleźli się na niższym, a nie na wyższym poziomie, tak jak prognozowała Arendt.

Sądzę, że nie przewidziała ona jednak, że nowa teoria kwantowa Heisenberga, w której „człowiek mierzy się sam ze sobą”, zawierała również załączki nowego podejścia do kosmologii. W tej książce starałem się pokazać, że czysto kwantowe spojrzenie na wszechświat przeciwstawia się bezwzględnyemu alienującemu siłom współczesnej nauki i pozwala kształtować na nowo kosmologię z wewnętrznego punktu widzenia — co stanowiło istotę ostatecznej teorii Hawkinga.

We wszechświecie kwantowym materialna przeszłość i przyszłość wyłaniają się z mgły możliwości w wyniku ciągłego procesu zadawania pytań i obserwacji. Ta obserwowalność, stanowiąca dwukierunkowy proces w samym sercu teorii kwantowej, który przekształca to, co może być, w to, co jest, nieustannie powołuje wszechświat coraz silniej do istnienia. Obserwatorzy — w tym kwantowym sensie — przyjmują w sprawach kosmicznych twórczą rolę nadającą kosmologii lekko subiektywny akcent.

Obserwacja wnosi również do teorii kosmologicznej subtelny element cofania się w czasie, ponieważ dzisiejszy akt obserwacji z mocą wsteczną ustala wynik Wielkiego Wybuchu „dawno temu”. Właśnie dlatego Stephen określił swoją ostateczną teorię jako kosmologię odgórną; odczytujemy podstawy historii wszechświata od tyłu — z góry na dół.

Wcielając obserwowalność do swej architektury, lecz bez nadawania życiu uprzywilejowanej roli, kosmologia odgórną eliminuje zarówno zagrożenie określone przez Arendt „zagubieniem w matematyce”, jak i pułapki zasady antropicznej. Nieco prozaicznie można by powiedzieć, że ostateczna teoria Stephena nie przedstawia człowieka ani jako boskiej postaci unoszącej się nad wszechświatem, ani jako bezradnej ofiary ewolucji na marginesie rzeczywistości, ale jako tego, kim rzeczywiście jest. Zmagając się z zasadą antropiczną przez większą część swojej kariery, Stephen był najwyraźniej zadowolony z tego wyniku. Kosmologia odgórną odwraca zagadkę pozornego projektu wszechświata w pewnym sensie do góry nogami. Prezentuje pogląd, że na poziomie kwantowym wszechświat kreuje własną bioprzyjazność. Zgodnie z tą teorią życie i wszechświat niejako pasują do siebie, ponieważ w głębszym sensie są razem powoływane do istnienia.

Tak więc zaryzykuję stwierdzenie, że ten pogląd oddaje prawdziwego ducha przewrotu kopernikańskiego. Kiedy Kopernik umieścił Słońce w centrum, zrozumiał, że od tej chwili trzeba będzie brać pod uwagę ruch Ziemi wokół Słońca, aby poprawnie interpretować obserwacje astronomiczne. Rewolucja kopernikańska nie prowadziła do wniosku, że nasza pozycja we wszechświecie jest nieistotna, lecz jedynie, że nie jest uprzywilejowana. Pięć wieków później odgórną kosmologia powraca do tych korzeni i moim zdaniem Arendt byłaby z tego zadowolona.

Ostateczna teoria Hawkinga nie powstała z nagłej sympatii dla takiego czy innego stanowiska filozoficznego. Stephen próbował za wszelką cenę powstrzymać się od przyjęcia jakiegokolwiek poglądu. Uważał, że Einstein ze swoim statycznym wszechświatem i niechęcią do zaakceptowania teorii

kwantowej zbytnio kierował się swoimi filozoficznymi uprzedzeniami i starał się unikać popełniania tych samych błędów. Nasze podejście odgórne rozwinęliśmy przede wszystkim jako próbę rozwikłania paradoksów multiświata i znalezienia lepszej teorii kosmologicznej. Z perspektywy czasu to przedsięwzięcie okazało się dość produktywne z filozoficznego punktu widzenia.

Odkrycie pod koniec lat dwudziestych XX wieku, że wszechświat ma historię, jest jednym z najbardziej zaskakujących odkryć wszech czasów. Od prawie stulecia badamy tę historię osadzoną na niewzruszonym fundamencie niezmiennych praw natury. Jednak istotą teorii, którą zaproponowaliśmy ze Stephenem, jest, że to podejście nie oddaje głębi i zakresu tego, co Lemaître odkrył na temat wszechświata. Przedstawiona przez nas kosmologia kwantowa odczytuje historię wszechświata od wewnątrz i w sposób uwzględniający na najwcześniejszych etapach genealogię praw fizycznych. Naszym zdaniem to nie prawa same w sobie, ale ich zdolność do zmiany jest fundamentalna. W ten sposób kosmologia odgórna dopełnia konceptualną rewolucję w naszym myśleniu o wszechświecie, którą zapoczątkował Lemaître⁴.

Aby odkryć istotę tego, co kryje się w najwcześniejszych etapach kwantowych, należy usunąć wiele warstw złożoności, które oddzielają nas od narodzin wszechświata. Można to zrobić, śledząc ewolucję wszechświata do tyłu w czasie. Kiedy wreszcie docieramy do Wielkiego Wybuchu, otwiera się głębszy poziom ewolucji, na którym same prawa fizyki ulegają zmianom. Odkrywamy rodzaj metaewolucji, stadium, w którym reguły i zasady ewolucji fizycznej współewoluują ze stosującym się do nich wszechświatem.

Ta metaewolucja ma darwinowski odcień objawiający się w jej wzajemnej grze zmienności i selekcji odbywającej się w pierwotnym środowisku wczesnego wszechświata. Pojawia się zmienność, ponieważ przypadkowe przeskoki kwantowe powodują częste małe odchylenia od zachowań

deterministycznych, a czasami i większe. Pojawia się selekcja, ponieważ niektóre z tych odchyłeń — zwłaszcza te większe — mogą zostać wzmocnione i zamrożone w postaci nowych reguł, które pomagają kształtować późniejszą ewolucję. Oddziaływanie między tymi dwoma rywalizującymi ze sobą siłami w piecu gorącego Wielkiego Wybuchu prowadzi do procesu rozgałęziania — nieco analogicznego do tego, w jaki gatunki biologiczne pojawiają się miliardy lat później — w którym wymiary, siły i rodzaje cząstek najpierw się różnicują, a następnie przyjmują swą obowiązującą formę, gdy wszechświat rozszerza się i ochładza poniżej dziesięciu miliardów stopni. Losowość związana z tymi przejściami oznacza, że tak jak ewolucję darwinowską, wynik tej pradawnej warstwy kosmicznej ewolucji można zrozumieć tylko *ex post facto*.

Oczywiście łączenie kropek w drzewo praw fizycznych nadal będzie stanowić dla nas wyzwanie w dającej się przewidzieć przyszłości. Mając do dyspozycji jedynie skąpe zapisy z najwcześniejszych momentów wszechświata oraz większość jego zawartości w ciemnej i tajemniczej postaci, pochodzenie kosmosu okazuje się niezwykle trudne do rozszyfrowania. Ale postępy w technologii budowania teleskopów wciąż poszerzają możliwości naszych zmysłów. Od finezyjnych obserwacji mikrofalowego promieniowania tła po pomysłowe poszukiwania cząstek ciemnej materii i impulsów fal grawitacyjnych fizycy na całym świecie starają się odsłonić tę odległą epokę, w której kryją się nasze najgłębsze korzenie.

Jeśli teraz obowiązujące prawa fizyki są skamieniałymi relikami pradawnej ewolucji, to z ontologicznego punktu widzenia powinniśmy być może traktować je na równi z przypominającymi prawa cechami innych poziomów ewolucji. Jeszcze dobitniej można by twierdzić, że w wielkiej strukturze kosmologii kwantowej najwyraźniej nie ma najmniejszej różnicy ontologicznej między faktem, że religia chrześcijańska dominowała w Europie Zachodniej u zarania nowożytnej epoki naukowej, a na przykład wartością anomalnego momentu magnetycznego elektronu w modelu standardowym

fizyki cząstek. Oba są zamrożonymi przypadkami, lecz o zdecydowanie innych poziomach złożoności.

Model początku pozbawionego brzegów zaproponowany przez Stephena — sformułowany w perspektywie odgórnej! — jest kluczem do uświadomienia sobie fundamentalnie historycznej perspektywy na fizykę i kosmologię, za którą się opowiadam, postrzegania fizyki, które obejmuje genezę praw. Hipoteza braku brzegów przewiduje, że jeśli prześledzimy pierwotny wszechświat możliwie najgłębiej wstecz w czasie, to stwierdzimy, że jego strukturalne właściwości coraz bardziej zanikają i ulegają przekształceniu, i że ostatecznie dotyczy to też samego czasu. Czas na początku mógłby być zlany w jedną całość z przestrzenią, tworząc rodzaj wyżej wymiarowej sfery, zamykając wszechświat w nicości. Doprowadziło to wczesnego Hawkinga — nadal rozumującego w oddolny sposób przyczynowy — do wniosku, że wszechświat został stworzony z niczego. Jednak ostateczna teoria Hawkinga proponuje całkowicie inną interpretację tego zamknięcia czasoprzestrzeni podczas Wielkiego Wybuchu. Późniejszy Hawking utrzymywał, że ta początkowa nicość w niczym nie przypomina pustki próżni, z której mogą, choć nie muszą narodzić się wszechświaty, ale jest znacznie głębszym horyzontem epistemicznym nieobejmującym przestrzeni, czasu i — co najważniejsze — żadnych praw fizycznych. „Początek czasu” w ostatecznej teorii Stephena to granica tego, co można powiedzieć o naszej przeszłości, a nie tylko początek wszystkiego, co istnieje. Pogląd ten szczególnie potwierdza holograficzna forma tej teorii, w której wymiar czasu, a więc i podstawowe pojęcie ewolucji, będące cechą charakterystyczną koncepcji redukcjonistycznych, są postrzegane jako emergentne właściwości wszechświata. Z holograficznego punktu widzenia cofanie się w czasie jest jak coraz bardziej rozmyte spojrzenie na hologram. Dosłownie traci się coraz więcej informacji, które on koduje, aż wreszcie skończą się kubity. To będzie prawdziwy początek.

Niezwykłą właściwością kosmologii odgórnej jest jej wbudowany mechanizm, który ogranicza to, co możemy powiedzieć o świecie. To tak, jakby czysto kwantowe podejście do kosmosu chroniło nas przed posiadaniem zbyt dużej wiedzy. I to jest ważne, ponieważ stanowi właśnie zamknięcie naszej przeszłości w ostatecznej teorii Hawkinga i wymuszonej przez to zamknięcie fundamentalnej świadomości pewnej skończoności, co pozwala nam nie zagubić się w paradoksach multiświata. W kosmologii kwantowej multiświat znika niczym śnieg na słońcu. Kosmologia odgórna pozbawia różnorodny kosmiczny gobelin większości kolorów, ale ta redukcja, o dziwo, zwiększa zasięg predykcyjny tej teorii. Tak więc, jak przewidziała Hannah Arendt w swej wnikliwej analizie, odrzucając archimedesowy punkt widzenia, teoria kosmologiczna staje się większa, a nie mniejsza. Cytując zakończenie słynnego *Traktatu* Wittgensteina: „O czym nie można mówić, o tym trzeba milczeć”. Potęgą kwantowego spojrzenia na kosmos polega na tym, że daje nam narzędzia matematyczne, aby rzeczywiście milczeć.

Rezultatem jest głęboka rekonstrukcja tego, co naszym zdaniem kosmologia może nam ostatecznie powiedzieć o świecie. Wczesny Hawking (tak samo jak wczesny autor) poszukiwał głębszego zrozumienia projektu wszechświata w warunkach fizycznych na początku czasu. Założył (założyliśmy), że głęboko w matematyce opisującej Wielki Wybuch jest ukryte fundamentalne, przyczynowe wyjaśnienie, które określi — jak często mawiał — „dlaczego wszechświat jest, jaki jest”. Tym samym założyliśmy, że istnieje ostateczna teoria, która zastępuje fizyczny wszechświat — lub multiświat. Po wywróceniu kosmologii do góry nogami późniejszy Hawking twierdził, że jego wcześniejsze alter ego popełniło błąd. Nasza odgórna perspektywa odwraca hierarchię między prawami a rzeczywistością w fizyce. Prowadzi to do nowej filozofii fizyki, która odrzuca ideę, że wszechświat jest maszyną stosującą się do bezwarunkowych, wcześniej istniejących praw, i zastępuje ją wizją wszechświata jako samoorganizującego się bytu, w którym pojawiają się wszelkiego rodzaju emergentne wzorce, a najbardziej ogólne z nich

nazywamy prawami fizyki. Można by powiedzieć, że w kosmologii odgórnej to prawa służą wszechświatowi, a nie wszechświat prawom. Według tej teorii, jeśli istnieje odpowiedź na wielkie pytanie o istnienie, to należy ją znaleźć w tym świecie, a nie w strukturze absolutów poza nim.

Podsumowałem ogólne zasady stojące za podejściem odgórnym na połączonym tryptyku, który naszkicowałem na ilustracji 43. Ten schemat uogólnia konwencjonalny paradygmat fizyki, w którym trzy filary — początek, ewolucja i obserwowalność — nie były splecione, lecz traktowane jak oddzielne, rozłączne byty, z których każdy ma swój własny status. Tryptyk stanowi nowe ramy przewidywania, w których opisany jest indukcyjny proces konstruowania praw dotyczących wszechświata i w którym w konsekwencji nasze teorie fizyczne są postrzegane jako jedna z wielu możliwości. Pogląd odgórny prowadzi do wniosku, że tak naprawdę prawa fizyki są właściwościami wszechświata, które wnioskujemy z naszych zbiorowych danych, zebranych w algorytmy obliczeniowe⁵, a nie przejawami jakiejś zewnętrznej prawdy. Pojawianie się kolejnych teorii fizycznych jest rozumiane jako określanie coraz bardziej ogólnych wzorców obejmujących coraz większą liczbę wzajemnie powiązanych zjawisk empirycznych. Oczywiście ta progresja znacząco zwiększa zdolność predykcyjną i użyteczność teorii fizycznej, ale czymś zupełnie innym jest stwierdzenie, że stawia nas to na ścieżce prowadzącej w kierunku ostatecznej teorii, która będzie wyjątkowa, niezależna od swej konstrukcji i od naszych danych. Podstawową obserwacją w istocie jest to, że zawsze istnieje bardzo wiele teorii pasujących do skończonego zbioru danych. Podobnie podejście odgórne do kosmologii powinno skłonić nas do podejrzeń, że znajdziemy wiele teorii prowadzących ku samym podstawom, ale nie punkt końcowy. W pewnym sensie ostateczna teoria Stephena stwierdza, że nie ma ostatecznej teorii.

Uwolniona od wszelkich roszczeń do prawdy absolutnej odgórna kosmologia zapewnia przestrzeń dla wielu sposobów myślenia, od sztuki do nauki, z których każdy służy innym celom i pobudza uzupełniające się

perspektywy. Jeśli nasze myślenie odgórne zawiera ziarna nowego światopoglądu, to jest ono całkowicie pluralistyczne. Pojęcia czasu i przypominających prawa wzorców pojawiają się w sposób zależny od zadawanych przez nas pytań i są osadzone w złożoności otaczającego nas wszechświata. Kiedy późniejszy Hawking przedstawił naszą postplatońską kosmologię w Watykanie w listopadzie 2016 roku, nie toczył już żadnych sporów z Bogiem ani z papieżem. Wręcz przeciwnie, Stephen znalazł silną i wzruszającą płaszczyznę porozumienia z papieżem Franciszkiem w ich wspólnym celu ochrony naszego domu w kosmosie dla dobra ludzkości dziś i w przyszłości.

Dzięki kosmologii kwantowej dowiadujemy się, że ewolucja biologiczna i ewolucja kosmologiczna nie są z gruntu odrębnymi zjawiskami, ale dwoma bardzo różnymi poziomami jednego gigantycznego drzewa ewolucyjnego. Ewolucja biologiczna dotyczy rozgałęzień w sferze o wysokiej złożoności, podczas gdy kosmologia zajmuje się warstwami o niskiej złożoności, z poziomami astrofizycznym, geologicznym i chemicznym wypełniającymi pośrednie zakresy. I chociaż każdy poziom ma swoją specyfikę, swój własny język, funkcja falowa wszechświata łączy je wszystkie ze sobą⁶. Sposób określany mianem „mieszmasz”, w jaki drzewo praw fizycznych wyłoniło się we wczesnym wszechświecie, pokazuje, że ogólne zasady darwinizmu, owej kwintesencji struktury biologicznej, sięgają aż do najgłębszego wyobraźnego poziomu ewolucji. Kosmologia kwantowa w pewnym sensie zasypuje wielką pojęciową przepaść oddzielającą od siebie przez eony biologię i fizykę. Mówi nam, że szkic drzewa życia Darwina (fot. 4 na wklejce) i szkic „niezdecydowanego” wszechświata Lemaître’a (fot. 3 na wklejce) są głęboko ze sobą powiązane, opisując dwa etapy pojedynczego nadrzędnego procesu historycznego.

Taki niezwyklej pomost ujawnia głęboką i potężną jedność natury. Ogromnie zróżnicowane poziomy ewolucji wiążą się we wzajemnie połączoną

całość za pośrednictwem wspólnych korelacji. Motyw przewodni całej naszej podróży — oszałamiające przystosowanie obowiązujących praw fizyki do pojawienia się życia — jest prawdopodobnie najlepszym przykładem takiej korelacji na wielu poziomach złożoności. Możemy teraz zacząć rozumieć na głębszym poziomie, jak my, będąc zaledwie drobną gałązką na drzewie życia, wraz ze wszystkimi innymi gatunkami na naszej planecie, łączymy się z otaczającym nas fizycznym wszechświatem i razem tworzymy coś, co stanowi życie w kosmosie. W gruncie rzeczy Karol Darwin w swej dalekowzroczności mógł już przewidzieć ten rozwój. W liście do George'a Wallicha z 1882 roku napisał: „Zasada ciągłości czyni możliwym to, że zasada życia okaże się w przyszłości częścią lub konsekwencją jakiegoś ogólnego prawa obejmującego całą naturę”. Być może w końcu znaleźliśmy się u progu realizacji wizji Darwina.

Niemniej wielu fizyków, zwłaszcza teoretyków (którzy mają wyrobioną opinię na temat głębszych korzeni praw natury) nadal woli wierzyć, że gdzieś istnieje ostateczna teoria, unosząc się ponad i poza fizyczną rzeczywistością — stanowiąca solidny jak skała fundament gmachu nauki w samym sercu istnienia. Ten sposób myślenia nie umknął uwadze Stephena⁷. „Niektórzy będą bardzo rozczarowani, jeśli na koniec okaże się, że nie ma ostatecznej teorii” — zauważył. Ale dodał: „Kiedyś należałem do tego obozu. Teraz cieszę się, że nasze poszukiwania zrozumienia nigdy się nie skończą i że zawsze będziemy mieć wyzwanie w postaci nowego odkrycia. Bez tego popadlibyśmy w zastój”. W typowy dla siebie sposób Stephen był gotów udać się w dalszą ekscytującą podróż ku postplatońskim odkryciom.

Podobnie jak Darwin, Stephen czuł, że w tym poglądzie kryje się wzniosłość. I rzeczywiście jest to niesamowicie fascynująca perspektywa! Jeśli wszystkie prawa naukowe są prawami emergentnymi — łącznie z „fundamentalnymi” prawami fizyki — to jesteśmy na progu odkrycia znacznie szerszego spojrzenia na naturę. W rzeczywistości spostrzeżenia te wiążą się

z najnowszymi osiągnięciami w wielu dyscyplinach naukowych. Dzięki odrzuceniu idei poszukiwania unikatowego zestawu reguł nauka w kilku miejscach rozgałęzia się, przechodząc od badania tego, „co jest”, do tego, „co może być”.

W naukach informatycznych sztuczna inteligencja i uczenie maszynowe tworzą nowe formy obliczania i rozumowania, niektóre ze zdolnością do ewoluowania, a nawet nabywania pierwiastka intuicji — ludzkiej lub innej. Bioinżynieria otwiera nowatorskie ścieżki ewolucyjne bazujące na wprowadzaniu innych kodów genetycznych, a nawet białek. Techniki manipulowania genomem, takie jak na przykład CRISPR⁸, pozwalają genetykom modyfikować DNA komórki w precyzyjny i ukierunkowany sposób, tworząc formy życia o kształtach lub możliwościach niedostępnych w „naturalnej przyrodzie”. Powstają twory od genialnych myszy po długowieczne robaki i być może pewnego dnia genialnych długowiecznych ludzi, czy raczej postludzi. Tymczasem inżynierowie kwantowi tworzą nowe formy materii, które wykazują osobliwe właściwości mikroskopowego splątania kwantowego w makroskopowych skalach codziennego życia. Niektóre z tych materiałów mogą nawet w sposób holograficzny zawierać nowe teorie grawitacji i czarnych dziur, a nawet rozszerzające się wszechświaty, których ewolucja jest zakodowana w operacjach algorytmicznych na dużej liczbie wzajemnie powiązanych bitów kwantowych.

Są to dalekosiężne osiągnięcia. Zamiast jedynie odkrywać prawa natury dzięki badaniu istniejących zjawisk, naukowcy zaczynają zakładać hipotetyczne prawa, a następnie projektować układy, w których się pojawiają. Dawny cel, jakim było odkrycie **p r a w d z i w e j** natury inteligencji lub **p r a w d z i w e j** teorii wszystkiego, może wkrótce zostać uznany za relikw przestarzałego i zbyt ograniczonego światopoglądu. W niedawnym artykule opublikowanym w serwisie „Quanta Magazine” Robbert Dijkgraaf, były dyrektor Instytutu Badań Zaawansowanych w Princeton, pisze: „To, co

zwykliśmy nazywać «naturą», jest tylko najmniejszym ułamkiem znacznie większego krajobrazu, który czeka na odsłonięcie”⁹.

Co więcej, osiągnięcia te wzajemnie się wzmacniają i na ich przecięciu możemy znaleźć najbardziej radykalne konsekwencje. W 2020 roku program głębokiego uczenia o nazwie AlphaFold — opracowany przez zespół Google DeepMind zajmujący się sztuczną inteligencją — nauczył się określania trójwymiarowego pofałdowanego kształtu białek na podstawie sekwencji ich aminokwasów, pokonując jedno z wielkich wyzwań w dziedzinie biologii molekularnej. W ciągu następnych kilku lat algorytmy uczenia maszynowego będą poszukiwać nowych cząstek w petabajtach danych produkowanych w Wielkim Zderzaczu Hadronów w CERN i wzorców fal grawitacyjnych w wypełnionych szumem sygnałach zebranych w projekcie LIGO. Z czasem powinniśmy oczekiwać, że takie programy głębokiego uczenia podążą razem z nami ku matematycznym podstawom naszych teorii fizycznych i — kto wie — być może od nowa stworzą bazowy język fizyki.

Tak więc, biorąc pod uwagę sferę „tego, co może być”, dotarliśmy na szczyt zupełnie nowego rozdziału w epoce współczesnej nauki. W XX wieku naukowcy określili podstawowy budulec natury: cząstki, atomy i molekuły są składnikami całej materii; geny, białka i komórki są elementami życia; bity, kody i systemy sieciowe stanowią podstawę obliczeń i komunikacji. W tym stuleciu zaczniemy tworzyć nową rzeczywistość z jej własnymi prawami poprzez łączenie tych składników w nowatorski sposób. Oczywiście reszta świata przyrody postępowała w ten sposób przez ponad trzysta miliardów lat kosmologicznej ekspansji i niemal cztery miliardy lat ewolucji biologicznej na Ziemi. Ale jak wymownie opisuje Dijkgraaf, to tylko najdrobniejszy ułamek wszystkich możliwych projektów. Liczba genów, które można opisać matematycznie, jest niewyobrażalna, znacznie większa niż liczba mikrostanów typowej czarnej dziury, ale ziemskie życie urzeczywistniło tylko niewielki ich ułamek. Podobnie zakres sił fizycznych i cząstek, które można stworzyć w teorii strun, jest ogromny. Mimo to ekspansja wczesnego wszechświata

doprowadziła do powstania tylko jednego wyjątkowego ich zestawu. Tak więc w całym spektrum złożoności, od fundamentalnej fizyki po intelekt, różnorodność możliwych opcji rzeczywistości jest bezgranicznie większa niż to, co do tej pory wytworzyła ewolucja naturalna. Wiek XXI to przełomowy okres w historii, kiedy zaczynamy korzystać z tej gigantycznej sfery.

Ta przemiana oznacza początek nowej ery, pierwszej tego rodzaju w historii Ziemi, a być może nawet w kosmosie, w której określony gatunek próbuje przekonfigurować i przewyższyć biosferę, w której wyewoluował. Powtarzając za Hannah Arendt, przechodzimy od zwykłego poddania się ewolucji w kierunku projektowania jej, a wraz z tym naszego człowieczeństwa.

To bez wątpienia czas wielkich oczekiwań. Sam zakres otwierających się przed nami ścieżek jest naprawdę fantastyczny w porównaniu do wszystkiego, czego do tej pory doświadczyliśmy. W niektórych gałęziach przyszłości nasze dzisiejsze wybory będą stanowić trampolinę do niewyobrażalnych innowacji i postludzkiego rozkwitu. W tych scenariuszach przyszłości era ludzka będzie stanowić znaczące przejście między pierwszymi prawie czterema miliardami lat boleśnie powolnej ewolucji darwinowskiej a kolejnymi niezliczonymi latami ewolucji wspomaganą przez technologiczne i inteligentne projekty — zarówno tutaj na Ziemi, jak i daleko poza nią.

Jednak to także bardzo niepewny czas. Ryzyko egzystencjalne wywołane działalnością człowieka, od rozprzestrzeniania broni jądrowej i globalnego ocieplenia po postępy w biotechnologii i sztucznej inteligencji, obecnie znacznie przewyższają ryzyko występujące naturalnie. Brytyjski astronom królewski sir Martin Rees oszacował, że biorąc pod uwagę wszelkie ryzyko, istnieje tylko 50 procent szans na to, że dotrzemy do 2100 roku bez ostatecznej katastrofy. Oksfordzki Instytut Ludzkiej Przyszłości ocenia ryzyko egzystencjalne dla ludzkości w tym stuleciu na około jedną szóstą. Zatem istnieje niezliczona ilość przyszłych ścieżek, a nie tylko mało prawdopodobna gałąź tu czy tam, na których możemy się pogрузić w chaosie, a nawet

zniknąć, pozostawiając po sobie jedynie niewiele znaczący przypis w księdze kosmicznej historii.

Mamy tylko jeden solidny punkt oparcia związany z naszą perspektywą: wydaje się, że żadna obca cywilizacja nie zbadała znacznej części układów gwiazdnych w naszym kosmicznym sąsiedztwie. Wygląda na to, że spośród miliardów gwiazd w naszym lokalnym stożku świetlnym przeszłości żadna nie przekształciła się w wielkoskalowy ekosystem o takim poziomie technologicznym, jaki możemy wkrótce osiągnąć. Prawa fizyczne są niezwykle przyjazne życiu, ale nie ma dowodów na istnienie w kosmosie żadnej innej jego formy. Nie odebraliśmy obcych audycji radiowych nadających pozaziemską poezję ani nie dostrzegliśmy tajemniczych projektów astroinżynierskich na niebie. Natomiast odnieśliśmy wielkie sukcesy w wyjaśnianiu zachowania układów gwiazdnych, naszej Galaktyki i całego obserwowalnego wszechświata na podstawie pojedynczego zbioru praw fizycznych. Zastanawiając się nad tym paradoksem, włoski fizyk Enrico Fermi latem 1950 roku zadał słynne pytanie: „Gdzie oni są?”. Zdaniem Fermiego brak dowodów na istnienie pozaziemskich cywilizacji, biorąc pod uwagę tak wyraźnie biofilne warunki, sugeruje, że gdzieś na drodze ewolucji od zwykłej materii nieożywionej do zaawansowanego technotopu, którym wkrótce możemy się stać, istnieje poważna przeszkoda. Czy główne wąskie gardła leżą w naszej przeszłości, w naszej przyszłości czy w nich obu? Jeśli ewolucyjne kroki w naszej przeszłości są tak niesamowicie mało prawdopodobne, że złożone formy życia są rzadkim zjawiskiem we wszechświecie, to główne wąskie gardło prawie na pewno będzie już za nami. Ale Fermiego dręczyło przecucie, że przeszkoda może leżeć w jakiejś pojedynczej transformacji, która nie pozwoli naszej dzisiejszej cywilizacji rozprzestrzenić się w kosmosie: możemy nie być w stanie przetrwać świata, który stworzyliśmy. Potrzebujemy szerszego rozeznania w tej kwestii w celu ustalenia sposobu kierowania się wspólnym dobrem, gdy tworzymy przyszłość¹⁰. W istocie Stephen podzielał przecucie Fermiego, mówiąc w pewnym momencie:

„Wystarczy tylko przyjrzeć się nam samym, aby zobaczyć, że inteligentne życie mogło się przekształcić w coś, czego nie chcielibyśmy spotkać”.

To prowadzi nas do pytań: Jaką przyszłość przewidujemy dla naszej planety i naszego gatunku? Czy postludzkie życie rozkwitnie i rozprzestrzeni się w kosmosie? Patrząc z perspektywy kwantowej, niezliczone ścieżki rozbiegające się w przyszłość w pewnym sensie już tam są w formie krajobrazu możliwości. Niektóre przyszłe scenariusze mogą nawet wydawać się dość przekonujące. Powinniśmy uczyć się z przeszłości, chociaż przypadek nieustannie daje o sobie znać, prowadząc historię do nieoczekiwanych zwrotów akcji. Przypadkowe zachowanie nietoperza w Wuhanie w 2019 roku to tylko jeden z przykładów. Potrafimy jednak podjąć kroki, aby uniknąć ryzykownych sytuacji poprzez uzyskanie wyraźniejszej globalnej wizji przyszłości, do której dążymy, i pomimo niepewności modelować na podstawie analiz ilościowych jej ewentualne funkcjonowanie. Główna odpowiedzialność w tym zakresie spadnie na społeczność naukowców i uczonych, aby działali w ramach grup eksperckich i zapewnili, że wszystkie ich badania są zintegrowane i ukierunkowane na wspólne dobro — od bioinżynierii po uczenie maszynowe i technologię kwantową.

Nie możemy po prostu czekać i być dobrej myśli. Jeśli ludzkość nie może nawet wspólnie wyobrazić sobie przyszłości, ku której zdąża, trudno mieć nadzieję, że osiągniemy coś choć trochę do niej podobnego. Nie mamy podręcznika, do którego moglibyśmy sięgnąć po wskazówki, ani żadnych fundamentów, nawet — co starałem się pokazać — u podstaw praw fizyki, które mogłyby złagodzić każdą porażkę. Jeśli ludzkość nie napisze własnego scenariusza, nikt tego za nas nie zrobi. Albo pozwolimy, by ewolucja obrała ślepy kurs, obniżając rangę ludzkości do wielkoskalowej kolonii mrówek, skolektywizowanej i monitorowanej, pozbawionej wszelkiej wolności; albo zdamy sobie sprawę, że los leży w naszych rękach i krok po kroku zaczniemy pracować nad nadaniem mu kształtu w postaci skoordynowanej wizji przyszłości, która może dowieść, że pesymizm Fermiego był nieuzasadniony.

W tym krytycznym momencie historii, kiedy stawiamy pierwsze kroki w roli natury, ważniejsze niż kiedykolwiek będzie zapamiętanie przesłania Hannah Arendt, że jesteśmy gośćmi na planecie Ziemia, a nie bogami działającymi z niebios. Jesteśmy czynnikami sprawczymi w nieustannie zmieniającym się wszechświecie. Jesteśmy ewolucją. Musimy znaleźć sposób na uzyskanie planetarnej świadomości, złagodzić alienację ze świata, o której wspominała Arendt, i skierować się w stronę perspektywy otwarcia na świat, która na nowo nada kształt naszym wzajemnym relacjom i związkom z resztą biosfery w sposób biorący pod uwagę przyszłość. Tylko dzięki uszanowaniu faktu, że jesteśmy zarządcami Ziemi i związanej z tym skończoności, będziemy w stanie uniknąć sytuacji, w której ludzkość uruchomi całą swoją potęgę przeciwko sobie samej.

Unieważniając widok znikąd, ostateczna teoria Stephena daje nam potężną dawkę nadziei. Nasza podróż do Wielkiego Wybuchu dotyczyła NASZYCH początków, a nie tylko narodzin wszechświata rozpoczynających się od Wielkiego Wybuchu, który stanowił tak kluczową jej część. Podobnie jak Einstein, Stephen uważał, że daleka przyszłość ludzkości będzie ostatecznie zależeć od tego, jak dobrze zrozumiemy nasze najgłębsze korzenie. To właśnie skłoniło go do podjęcia badań nad Wielkim Wybuchem. Jego ostateczna teoria wszechświata jest czymś więcej niż tylko nauką kosmologią. To kosmologia w sensie humanistycznym, w której wszechświat jest postrzegany jako nasz ogromny dom, i jego fizyka jest zakorzeniona w naszej relacji z nim. Kosmologiczny finałowy akt Hawkinga łączy matematyczną dyscyplinę Isaaca Newtona z wnikliwymi spostrzeżeniami Karola Darwina, że w głębszym sensie wszyscy jesteśmy jednością. Dobrze się stało, że prochy Stephena zostały pochowane między grobami Newtona i Darwina w nawie londyńskiego opactwa westminsterskiego.

Podczas mojej podróży ze Stephenem poznałem go jako człowieka, który pragnie, abyśmy wszyscy przyjęli bardziej kosmiczną perspektywę naszego

istnienia i myśleli w kategoriach głębokiego czasu. Jego ostateczna teoria przypomina kiełkujące ziarno, które ma w sobie potencjał, by wyrosnąć na nowy światopogląd w całości oparty na nauce i jednocześnie osadzony w naszym człowieczeństwie. Oczywiście ten pomost prowadzący od kosmologii kwantowej do moralnego wszechświata jest niezwykle długi i kruchy. Ale tak samo jest z pomostem zbudowanym przez Arendt, od Galileusza obserwującego Księżyc do dzisiejszego zaawansowanego technologicznie społeczeństwa.

Stephen mocno wierzył, że śmiałość naszych pytań i głębia uzyskanych odpowiedzi mogą pozwolić nam bezpiecznie i mądrze pokierować Ziemią ku przyszłości.

Historia jego życia, w którym po przerażającej diagnozie ALS odnalazł siłę, aby kochać, mieć dzieci, doświadczać świata we wszystkich jego wymiarach i zrozumieć wszechświat, zainspirowała miliony i pozostanie potężną metaforą tego, co ludzkość może osiągnąć. Jego pożegnalne przesłanie — wysłane w kosmos podczas nabożeństwa żałobnego 15 czerwca 2018 roku w opactwie westminsterskim — mówi właśnie o tym: „Kiedy spoglądamy na Ziemię z kosmosu, widzimy nas wszystkich jako całość; widzimy jedność, a nie podziały. To taki prosty obraz z przekonującym przesłaniem: jedna planeta, jedna rasa ludzka. Nasze jedyne ograniczenia to sposób, w jaki siebie postrzegamy. Musimy się stać obywatelami świata. Pracujmy wspólnie, aby przyszłość była miejscem, do którego chcemy dotrzeć”.

Od Stephena Hawkinga możemy się uczyć kochać świat tak bardzo, że staramy się wymyślić go na nowo i nigdy się nie poddawać. Być ludźmi w pełnym tego słowa znaczeniu. Mimo niemal całkowitego paraliżu Stephen był najbardziej wolnym człowiekiem, jakiego znałem.

¹ Esej Arendt idzie w parze z prologiem i fragmentem jej książki *Kondycja ludzka*. Został również ponownie opublikowany, z niewielkimi poprawkami, w drugim wydaniu *Between Past and Future: Eight Exercises on Political Thought* (New York: Viking Press, 1968).

² Arendt uważa, że z jednej strony człowiek jest istotą ziemską mocno osadzoną w świecie, zmagającą się z przeciwnościami losu i żywiołami, na które nie ma wpływu. Z drugiej zaś człowiek jest rzemieślnikiem, który może do pewnego stopnia zmieniać świat. Zależki ludzkiej wolności według Arendt leżą u zbiegu tych dwóch ścierających się ze sobą sił.

³ Werner Heisenberg, *The physicist's conception of Nature*, pierwsze wydanie amerykańskie (New York: Harcourt, Brace, 1958).

⁴ Z ich pism na ten temat trudno wywnioskować, czy pionierzy tacy jak Dirac czy Lemaître już wyobrażali sobie pochodzenie wszechświata jako swego rodzaju granicę epistemiczną. Jednak wkrótce po ukończeniu tego manuskryptu, VRT, flamandzki nadawca publiczny, znalazł w swoich archiwach dawno zaginiony wywiad z Lemaître'em przeprowadzony przez Jerome Verhaeghe'a w 1964 roku, w którym rozważa on swoją hipotezę pierwotnego atomu z 1931 roku i szczegółowo omawia ten punkt. Lemaître dość wyraźnie przywołuje ideę, że „atom”, tak jak go sobie wyobraża, nie tylko reprezentuje początek czasu, ale głębsze źródło, do którego nie można dotrzeć myślą, „niedostępny początek, który stoi tuż przed fizyką”.

⁵ Stosując algorytmy obliczeniowe, możemy kompresować dane i przekazać je w krótszej treści. Weźmy na przykład pod uwagę orbity planet. Można je opisać, określając położenia i pędy wszystkich planet w kolejnych momentach, ale informacja ta daje się skompresować do określenia położenia i pędów w jednej chwili, dołączając do nich równania ruchu Newtona. Co więcej, dane z wielu różnych układów grawitacyjnych można skompresować do informacji zawierającej te same równania ruchu. To właśnie nadaje równaniom Newtona ich uniwersalny, przypominający prawo charakter. Różni się to jednak od nadawania tym równaniom niezależnego, obiektywnego istnienia, które zastępuje kosmos.

⁶ W tym wielkim schemacie kosmologii kwantowej rozróżnienie między poziomami ewolucji nie jest fundamentalne, ale pojawia się, ponieważ wynika ze skupienia się na różnych rodzajach rozgałęzień w funkcji falowej wszechświata. Wyższe poziomy ewolucji dotyczą pytań uwarunkowanych nie tylko funkcją falową, lecz także konkretnymi skutkami procesów rozgałęziania prowadzących do tego poziomu. Na przykład, aby zbadać abiogenezę na Ziemi cztery miliardy lat temu, zadaje się funkcji falowej wszechświata pytania z zakresu chemii. Dlatego skupiamy się na rozgałęzieniach które są rozważane z tym poziomem. W tym celu należy dostarczyć wyniki pochodzące z niższych poziomów kosmologicznej, astrofizycznej i wczesnej geologicznej ewolucji oprócz modelu samej funkcji falowej.

⁷ Hawking, *Gödel i koniec fizyki*, op. cit.

⁸ Zgrupowane, regularnie rozmieszczone krótkie powtórzenia palindromowe (Clustered Regularly-Interspaced Short Palindromic Repeats).

⁹ Robbert Dijkgraaf, *Contemplating the end of physics*, „Quanta Magazine” (listopad 2020).

¹⁰ Aby podtrzymać pewien stopień optymizmu, muszą zaistnieć szczególnie mało prawdopodobne kroki ewolucyjne w przeszłości. Tempo formowania się gwiazd i obfitość planet krążących wokół innych gwiazd wskazują, że najprawdopodobniej warunki fizyczne

nie stanowią poważnej przeszkody. Tutaj znowu mamy do czynienia z przyjaznym życiu charakterem praw fizycznych. Jednak niektóre kroki związane z ewolucją biologiczną pozostają w wyraźny sposób niepewne. Biolodzy ewolucyjni określili mniej więcej siedem kroków trudnych do przejścia metodą prób i błędów, które są prawdopodobnymi kandydatami na główne przeszkody na drodze do wiecznego życia. Należą do nich abiogeneza, formowanie złożonych komórek eukariotycznych, rozmnażanie płciowe, wielokomórkowe formy życia i pojawienie się inteligencji. W ciągu najbliższej dekady możemy się więcej dowiedzieć o prawdopodobieństwie niektórych z tych przejść dzięki misjom na Marsa i obserwacji atmosfery planet pozasłonecznych. Gdyby naukowcy znaleźli życie wielokomórkowe na Marsie (pod warunkiem, że wyewoluowało ono niezależnie od życia ziemskiego) lub sygnatury prymitywnych form życia w składzie chemicznym atmosfery planet pozasłonecznych, te odkrycia wyeliminowałyby niektóre etapy z naszej przeszłości jako kandydatów do mało prawdopodobnych przejść, jeszcze bardziej wyostrażając paradoks Fermiego.

Podziękowania

Moja podróż ze Stephenem Hawkingiem nie byłaby możliwa bez pomocy wielu kolegów i przyjaciół.

Dziękuję Adrianowi Ottewillowowi i Peterowi Hoganowi z Dublina w Irlandii, którzy w 1996 roku wsadzili mnie do pociągu jadącego do Cambridge w Wielkiej Brytanii. Serdecznie dziękuję Neilowi Turokowi, którego fascynujące zajęcia w tej mekce kosmologii teoretycznej zachęciły mnie do zapukania do drzwi Stephena. Oraz moim kolegom doktorantom z zespołu Hawkinga i Turoka, w tym Christophe'owi Galfardowi, Harveyowi Reallowi, Jamesowi Sparksowi i Toby'emu Wisemanowi, za ich koleżeństwo.

„Powinieneś wyjechać jak najdalej” — powiedział mi Stephen, kiedy skończyłem studia. I tak też zrobiłem. Wielkie podziękowania dla Steve'a Giddingsa, Davida Grossa, Jima Hartle'a, Gary'ego Horowitza, Dona Marolfa, Marka Srednickiego i nieżyjącego już Joe Polchinskiego za stworzenie tak niezwykłego, stymulującego środowiska badawczego na Uniwersytecie Kalifornijskim w Santa Barbara w tych ekscytujących wczesnych dniach kosmologii strun.

Mniej więcej w tym czasie Stephen związał się z George'em Mitchellem. Szczerze podziękowania dla rodziny Mitchell za stworzenie wspaniałego azylu w ich posiadłości Cook's Branch Conservancy, gdzie Stephen mógł pracować. Specjalne podziękowania należą się także Międzynarodowemu Instytutowi Solvaya w Brukseli, jego prezesowi Jean-Marie Solvayowi i wieloletniemu dyrektorowi Marcowi Henneaux oraz *mater familias* instytutu, pani Marie-Claude Solvay, której wyraziste wspomnienia o Oppenheimerze, Feynmanie czy Lemaître sprwiają, że historia fizyki XX wieku staje nam przed oczami jak żywa. Ciepło i szczodrość rodziny Solvay sprawiły, że instytuty stały się czymś więcej niż naukową przystanią na naszej drodze.

Na przestrzeni lat wiele rozmów z licznymi kolegami wywarło głęboki wpływ na moje myślenie o pochodzeniu czasu. Szczególne podziękowania kieruję do Dio Anninosa, Nikołaja Bobewa, Frederika Denefa, Gary’ego Gibbonsa, Jonathana Halliwella, Teda Jacobsona, Olivera Jansseny, Matta Klebana, Jean-Luca Lehnery, Andreia Lindego, Juana Maldaceny, Dona Page’a, Aleksieja Starobinskiego, Thomasa von Rieta, Alexa Vilenkina i — raz jeszcze — Gary’ego Horowitza, Joe Polchinskiego, Marka Srednickiego i Neila Turoka. Dziękuję również Europejskiej Radzie ds. Badań Naukowych i Research Foundation Flanders za wsparcie badań specjalistycznych leżących u podstaw szerszej teorii kosmologicznej, którą rozwijam w tej książce.

Oczywiście praca ze Stephenem byłaby niemożliwa bez jego zespołów wsparcia, wielu absolwentów, asystentów i sekretarek, zwłaszcza Jona Wooda i Judith Croasdell, oraz opiekunów i pielęgniarek, których profesjonalna i kreatywna opieka, majsterkowanie i planowanie utrzymywały statek kosmiczny Hawking w sprawnym działaniu daleko poza czas trwania misji.

Wielkie podziękowania należą się Jimowi Hartle’owi, naszemu towarzyszowi podczas tej ekscytującej podróży, którego kwantowe podejście do wszechświata zawsze było jasną latarnią na horyzoncie, oraz Tomowi Dedeurwaerdere, mojemu nieocenionemu doradcy i źródłu inspiracji.

Jestem wdzięczny Centrum Kosmologii Teoretycznej w Cambridge i jego darczyńcom, a także Trinity College za stypendium na krytycznym rozwidleniu dróg. Również Martinowi Reesowi i Papieskiej Akademii Nauk, którzy wspomogli rozpowszechnianie wczesnej wersji ostatecznej teorii kosmologicznej Stephena.

Szczerze i szczególne podziękowania kieruję do Lucy Hawking za jej delikatne i odważne rady, zwłaszcza w trudnych późniejszych etapach, kiedy zbliżały się ostatnie dni Stephena i narodził się pomysł zrelacjonowania naszej podróży. Kilka pierwszych linijek tej książki zostało napisanych przy kuchennym stole w Wordsworth Grove.

Moim celem było zestawienie naszych wspólnych wysiłków z szerszym

historycznym rozwojem zarówno kosmologii relatywistycznej, jak i kwantowej. Za pouczające dyskusje na temat tej historii dziękuję niezyczącemu już Johnowi Barrowowi, Gary'emu Gibbonsowi, Dominique'owi Lambertowi, Malcolmowi Longairowi i Jimowi Peeblesowi. Specjalne podziękowania należą się również Fransowi Cerulusowi za podzielenie się w wieku dziewięćdziesięciu pięciu lat swoimi wciąż żywymi osobistymi wspomnieniami o Abbé Georges'u Lemaître. A także Liliane Moens i Véronique Fillieux za ich nieocenioną pomoc w poruszaniu się po bogatych archiwach Lemaître'a na Katolickim Uniwersytecie w Louvain; oraz Grahamowi Farmelowi za pouczającą dyskusję na temat wczesnego życia naukowego i osobistego Hawkinga.

Zaangażowanie moich bliskich kolegów z Louvain, Nikołaja Bobewa, Toine'a Van Proeyena i Thomasa Van Rieta, w prężną grupę badawczą w Instytucie Fizyki Teoretycznej stworzyło stymulujące środowisko pisarskie pomimo wyzwań związanych z izolacją spowodowaną wirusem COVID-19. Dziękuję również mojemu szerszemu gronu kolegów w Leuven i Holandii, od wizjonerów pielęgnujących cenne środowisko akademickie, w którym znajduje się miejsce dla pisarstwa naukowego dla szerszego grona czytelników, po bohaterów próbujących przetestować nasze najbardziej zaawansowane teorie kosmologiczne. Specjalne podziękowania dla Robberta Dijkgraafa za, być może nieświadome, dostarczenie wielu inspiracji i zachęty.

Demisowi Hassabisowi za inspirującą rozmowę na temat tego, jak może wyglądać przyszłość kosmologii — i co może oznaczać — w erze sztucznej inteligencji. Dramaturgowi Thomasowi Ryckewaertowi, który odważnie przeniósł to spektrum idei (i autora) na scenę. Jej Królewskiej Mości belgijskiej królowej Matyldzie za wspianą wizytę na wystawie *To the Edge of Time* w Louvain. I mojej współkuratorce, Hannah Redler Hawes, za entuzjastyczne zapuszczanie się na rozległe otwarte przestrzenie między nauką a sztuką, dodając przy tym odrobinę artystycznego akcentu do tego dzieła.

Dziękuję również i gratuluję archiwistom VRT, flamandzkiego publicznego

nadawcy. Ledwo wysechł atrament na tym rękopisie, kiedy odnaleźli zaginione nagranie wywiadu z Georges'em Lemaître'em z 1960 roku, prezentującym zaskakujące poparcie dla intelektualnego pomostu prowadzącego od niego do późniejszego Hawkinga, który przedstawiam w tej książce.

Dziękuję Aïshy De Grauwe, która po mistrzowsku przekształciła moje szkice w obrazy ilustrujące tekst, a także George'owi Ellisowi, Rogerowi Penrose'owi i Jamesowi Wheelerowi za życzliwą pomoc przy niektórych starszych rycinach. Pragnę również wyrazić uznanie dla kustoszy gabinetu Hawkinga w londyńskim Muzeum Nauki oraz dokumentów Paula A.M. Diraca na Uniwersytecie Stanowym Florydy.

Za dobre rady i przewodnictwo podczas całego projektu książki bardzo dziękuję moim agentom literackim, Maxowi Brockmanowi i Russellowi Weinbergerowi. Hilary Redmon, mojej wspaniałej redaktorce z Random House, za jej błyskotliwe uwagi redakcyjne i ciągłą zachętę, a także Miriam Khanukaev za prowadzenie rękopisu przez etap produkcji.

Na koniec serdecznie dziękuję Nathalie i naszym dzieciom, Salomé, Ayli, Noah i Raphaelowi, za stworzenie tak wspaniałego i pełnego miłości domu podczas mojej podróży.

Źródła ilustracji

- Il. 1: © Science Museum Group (UK)/Science & Society Picture Library.
- Il. 2: © ESA—European Space Agency/Planck Observatory.
- Il. 3, 5, 9, 19–21, 23–25, 27–31, 33–38, 41–43, 45–46, 48–49, 52–54, 57: © autor/Aïsha De Grauwe.
- Il. 4: Za zgodą Ministerstwa Kultury — Museo Nazionale Romano, Terme di Diocleziano, fotografia nr 573616: Servizio Fotografico SAR.
- Il. 6: domena publiczna/instytucja udzielająca ETH-Bibliothek Zürich, Rar 1367: 1.
- Il. 7a, 26, 58: © fotografia Anna N. Zytkow.
- Il. 7b, 14, 17, 50–51: © autor.
- Il. 8: domena publiczna/Posner Library, Carnegie Mellon.
- Il. 10: © Event Horizon Telescope Collaboration.
- Il. 11: przedruk z: Roger Penrose, *Gravitational Collapse and Space-time Singularities*, „Physical Review Letters” 14 (1965), s. 57–59. © 2022 by the American Physical Society.
- Il. 12: pierwsza publikacja w: Vesto M. Slipher, *Nebulae*, „Proceedings of the American Philosophical Society” 56 (1917), s. 403.
- Il. 13: © Georges Lemaître Archives, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, BE 4006 FG LEM 609.
- Il. 15a–15b: Paul A.M. Dirac Papers, Florida State University Libraries.
- Il. 16: fotografia Eric Long, Smithsonian National Air and Space Museum (NASM 2022–04542).
- Il. 18: przedruk z: George Ellis, *Relativistic Cosmology*, w: *Proceedings of the International School of Physics „Enrico Fermi”*, red. R.K. Sachs, Academic Press, New York–London 1971.
- Il. 22: zbiory fotograficzne, Caltech Archives/CMG Worldwide.
- Il. 32: archiwum osobiste profesora Andreia Lindego.
- Il. 39: © Maximilien Brice/CERN.
- Il. 40: © fotografia Paul Ehrenfest, dzięki uprzejmości AIP Emilio Segrè Visual Archives.
- Il. 44: © „The New York Times”/Belga image.
- Il. 47: przedruk z: John A. Wheeler, *Frontiers of Time*, w: *Problems in the Foundations of Physics, Proceedings of the International School of Physics „Enrico Fermi”*, red. G. Toraldo di Francia, North-Holland Pub. Co., Amsterdam–New York 1979/KB-National Library.
- Il. 55: © M.C. Escher’s, *Circle Limit IV* © 2022 The M.C. Escher Company, Holandia. Wszelkie prawa zastrzeżone. www.mcescher.com.
- Il. 56: przedruk z: John A. Wheeler, *Geons*, „Physical Review” 97 (1955), s. 511–536.

Wklejka kolorowa

Fot. 1: © Georges Lemaître Archives, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, BE 4006 FG LEM 836.

Fot. 2: pierwsza publikacja w: „Algemeen Handelsblad”, 9 lipca 1930, „AFA FC WdS 248”, Leiden Observatory Papers.

Fot. 3: © Georges Lemaître Archives, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, BE 4006 FG LEM 704.

Fot. 4: domena publiczna.

Fot. 5: © „The New York Times Magazine”. Pierwsza publikacja 19 lutego 1933.

Fot. 6: © Succession Brâncuși — wszelkie prawa zastrzeżone (Adagp)/Centre Pompidou, MNAM-CCI /Dist. RMN-GP.

Fot. 7: pierwsza publikacja w: Thomas Wright, *An Original Theory of the Universe*, 1750.

Fot. 8: M.C. Escher *Oog* © The M.C. Escher Company—Baarn, Holandia. Wszelkie prawa zastrzeżone, www.mcescher.com.

Fot. 9: © ESA—European Space Agency/Planck Observatory.

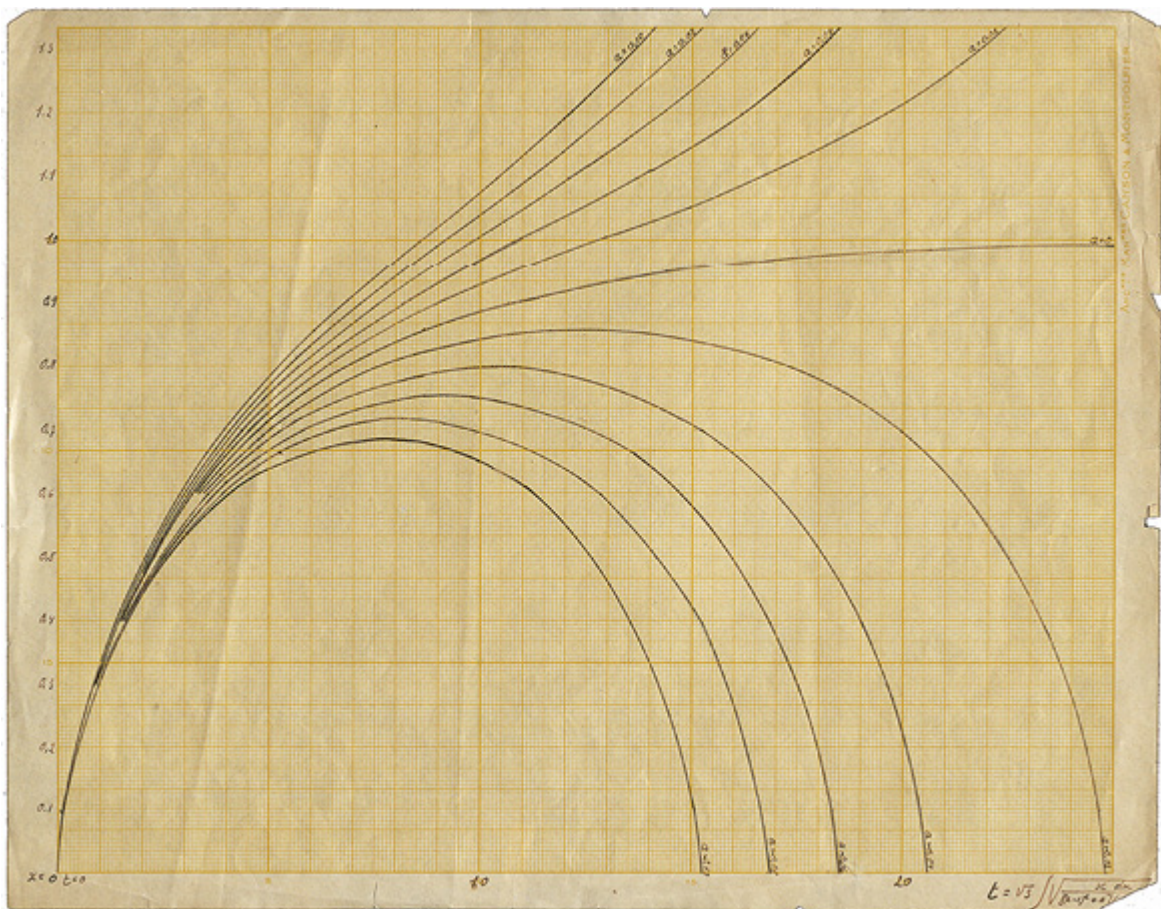
Fot. 10: © Science Museum Group (UK)/Science & Society Picture Library.

Fot. 11: © Sarah M. Lee.

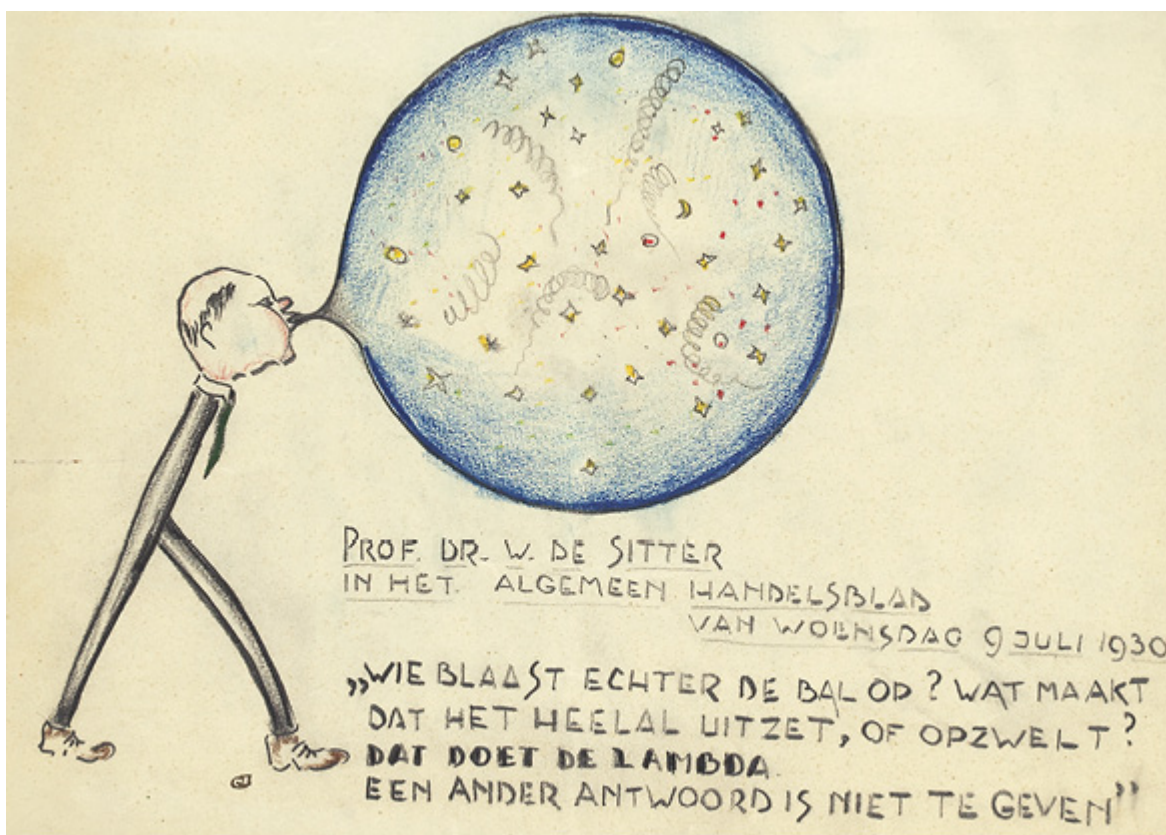
Bibliografia

- Arendt Hannah, *The Human Condition*. Chicago: University of Chicago Press, 1958 (wyd. polskie: *Kondycja ludzka*, przeł. Anna Łagodzka, Wydawnictwo Aletheia, 2020).
- Carr B.J., Ellis F.R., Gibbons G.W. i in., *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society: Stephen William Hawking CH CBE, 8 January 1942–14 March 2019*, Royal Society, 2019.
- Carroll Sean, *The Big Picture: On the Origins of Life, Meaning, and the Universe Itself*, London: Oneworld, 2017 (wyd. polskie: *Nowa perspektywa. Pochodzenie życia, świadomości i Wszechświata*, przeł. Urszula Seweryńska, Mariusz Seweryński, Prószyński i S-ka, 2017).
- Davies Paul, *The Goldilocks Enigma: Why Is the Universe Just Right for Life?* London: Allen Lane, 2006 (wyd. polskie: *Kosmiczna wygrana. Dlaczego Wszechświat sprzyja życiu?* przeł. Ewa L. Łokas, Bogumił Bieniok, Prószyński i S-ka, 2008).
- Farmelo Graham, *The Strangest Man: The Hidden Life of Paul Dirac, Mystic of the Atom*, New York: Basic Books, 2009 (wyd. polskie: *Przedziwny człowiek. Sekretne życie Paula Diraca, geniusza mechaniki kwantowej*, przeł. Tomasz Lanczewski, Copernicus Center Press, 2016).
- Greene Brian, *The Fabric of the Cosmos*, New York: Alfred A. Knopf, 2004 (wyd. polskie: *Struktura kosmosu. Przestrzeń, czas i struktura rzeczywistości*, przeł. Ewa L. Łokas, Bogumił Bieniok, Prószyński i S-ka, 2005).
- Greene Brian, *The Hidden Reality: Parallel Universes and the Deep Laws of the Cosmos*, New York: Alfred A. Knopf, 2011 (wyd. polskie: *Ukryta rzeczywistość. W poszukiwaniu wszechświatów równoległych*, przeł. Marek Krośniak, Prószyński i S-ka, 2012).
- Halpern Paul, *The Quantum Labyrinth*, New York: Basic Books, 2018.
- Hawking Stephen, *A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes*, New York: Bantam Books, 1988 (wyd. polskie: *Krótką historia czasu. Od wielkiego wybuchu do czarnych dziur*, przeł. Piotr Amsterdamski, Alfa, 1990).
- Hawking Stephen, Mlodinow Leonard, *The Grand Design*. New York: Bantam Books, 2010 (wyd. polskie: *Wielki Projekt*, przeł. Jarosław Włodarczyk, Albatros, 2019).
- Lambert Dominique, *The Atom of the Universe: The Life and Work of Georges Lemaître*, Kraków: Copernicus Center Press, 2011.
- Nussbaumer Harry, Bieri Lydia, *Discovering the Expanding Universe*, Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- Pais Abraham, „*Subtle Is the Lord*”: *The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford: Oxford University Press, 1982 (wyd. polskie: *Pan Bóg jest wyrafinowany... Nauka i życie Alberta Einsteina*, przeł. Piotr Amsterdamski, Prószyński i S-ka, 2001).
- Pross Addy, *What Is life?* Oxford: Oxford University Press, 2012.

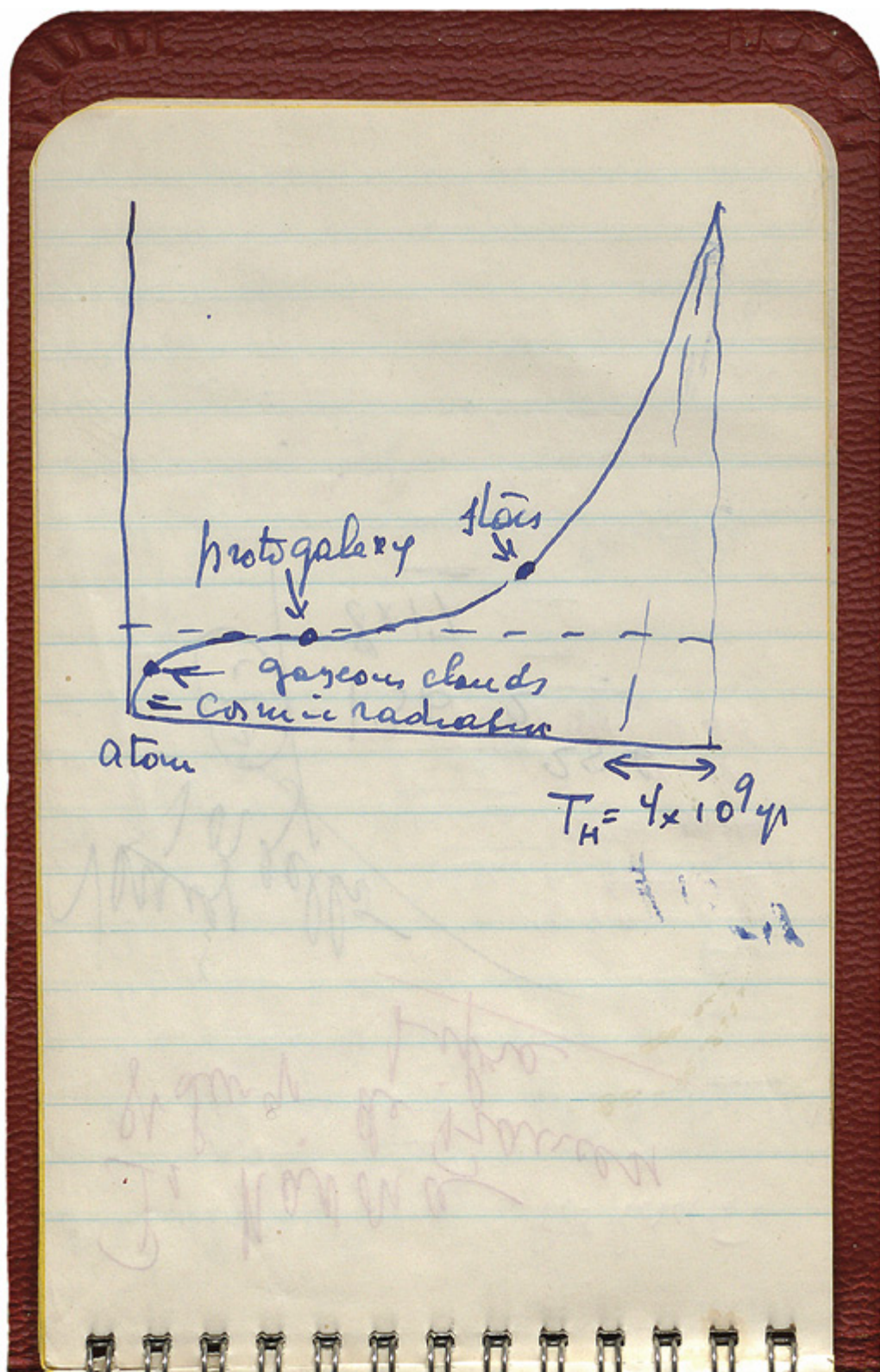
- Rovelli Carlo, *Anaximander*, Yardley: Westholme, 2011.
- Susskind Leonard, *The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design*, New York: Little, Brown, 2006 (wyd. polskie: *Kosmiczny krajobraz. Dalej niż teoria strun*, przeł. Mariusz Seweryński, Prószyński i S-ka, 2011).
- Susskind Leonard, *The Black Hole War*, New York: Little, Brown, 2008 (wyd. polskie: *Bitwa o czarne dziury*, przeł. Urszula Seweryńska, Mariusz Seweryński, Prószyński i S-ka, 2011).
- Weinberg Steven, *To Explain the World: The Discovery of Modern Science*, New York: Harper, 2015.
- Wheeler John Archibald, Ford Kenneth, *Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics*, London: Norton, 1998.



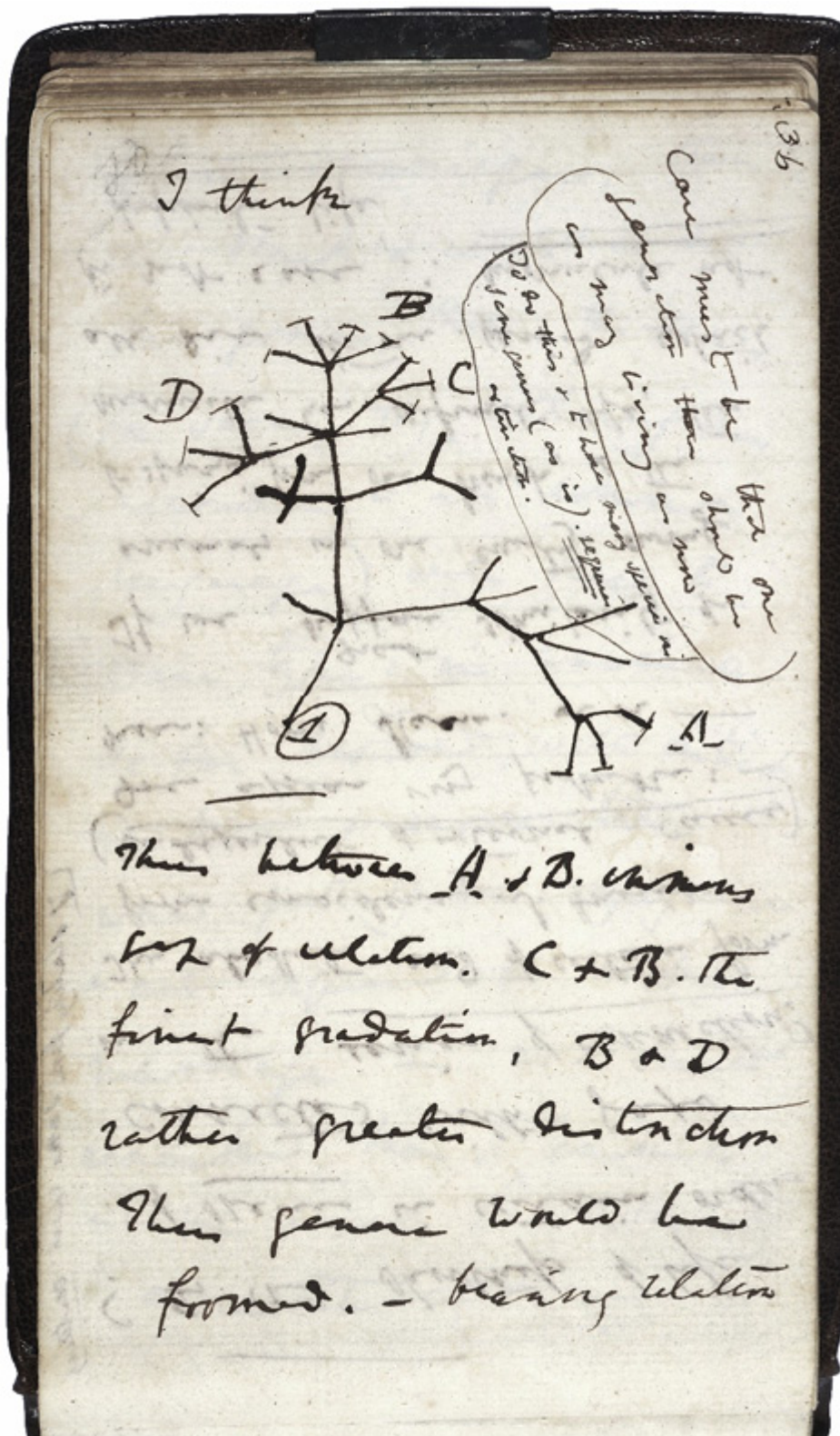
Fot. 1. Około 1930 roku Georges Lemaître sporządził ten słynny wykres przedstawiający ewolucję wszechświata. W lewym dolnym rogu wykresu Lemaître napisał „t = 0”, oznaczając pierwszy moment czasu, który stał się później znany jako Wielki Wybuch.



Fot. 2. „Kto nadmuchuje ten balon? Co powoduje ekspansję wszechświata?”
Ten rysunek ukazuje holenderskiego astronoma Willema de Sittera jako grecką literę lambda, w nawiązaniu do kosmologicznej stałej Einsteina λ , nadmuchującego wszechświat jak balon.



Fot. 3. Szkic „niezdecydowanego” wszechświata autorstwa Georges’a Lemaître’a w jego fioletowym notatniku. Pochodząca z pierwotnego atomu jego nieregularna krzywa ekspansji stwarza warunki odpowiednie do pojawienia się życia.



Fot. 4. Pierwotny szkic drzewa życia autorstwa Karola Darwina w jego czerwonym Notatniku B, pokazujący, w jaki sposób pokrewne gatunki mogą pochodzić od wspólnego przodka.

LEMAITRE FOLLOWS TWO PATHS TO TRUTH

By DUNCAN AIRMAN
PARADELA.

THERE is no conflict between religion and science," the Abbé Lemaître has been telling audiences over and over again in this country and then proving it by explaining the aims of both. His view is interesting and important not because he is a Catholic priest, not because he is one of the leading mathematical physicists of our time, but because he is both. Here is a man who believes firmly in the Bible as a revelation from on high, but who develops a theory of the universe without the slightest regard for the teachings of revealed religion on general. And there is no conflict!

Such an attitude would have been preposterous to a Victorian physicist. Either you accept the whole book of Genesis and therefore shut yourself out of the world of science, or you accept science and repudiate the prophets as expounders of the manner in which the universe began. Today the physicist is maker. Behind his formulas there is something that is still veiled. He is half mystic and ready to admit that the universe may reveal itself in other ways than in mathematical equations or the hands and lines of a spectrophotograph.

The abbé, therefore, follows the trend of modern thinking and derives from it more than ordinary satisfaction because he happens to be trained in theology as well as in mathematical physics. Lemaître, like Eddington, finds that science and religion supplement each other. Science can never study the universe as a whole. It selects a small portion, as much as it can handle, and then makes deductions. To a cosmologist the earth and Mars are only planets wheeling around the sun. Are they inhabited? Are they washed by air and water? Why were they created? Is there purpose in the universe? Science is indifferent to such questions, but not religion.

The questions are just as legitimate as those that are asked by the physicist when he wonders what may be the meaning of a shift to the red in the spectra of distant nebulae. To search thoroughly for the truth involves a searching of souls as well as of spectra. And it is religion that satisfies the soul-searching instinct, according to Lemaître. In fact, he goes so far as to recommend a course in theology—to him a way of looking at the Bible—to physicists and biologists who see in the Book of Genesis only an interesting piece of ancient folklore.

LEMAITRE believes that if discussions could be carried on in a friendly, objective way, the church and the laboratory would find themselves closer together than they believe they are. Listen to him as he sits in a student's bare room in the atmosphere of the California Institute of Technology, a stoutish young man of 38 who wears horn-rimmed glasses and the expected Roman collar of a secular Catholic priest.

"This conflict," he begins with a smile and a French inflection in his otherwise perfect English—"where is it? Here we have this wonderful, this incessantly interesting and exciting universe. When we try to learn more about it, learn how it began and how it is put together, to find what it is all about, as you say in America, what are we doing? Only seeking the truth. And is not truth-seeking a service to God? Certainly everything in the Bible and in all authoritative Christian doctrine teaches that it is. Has any logical religious thinker of any faith ever denied it?"

"Do you know where the heart of the misunderstanding lies?" he asks. "It is really a joke on the scientists. They are a literal-minded lot. Hundreds of professional and amateur scientists actually believe the Bible pretends to teach science. This is a good deal like assuming

The Famous Physicist, Who Is Also a Priest, Tells Why He Finds No Conflict Between Science and Religion

that there must be authentic religious dogma in the biblical canon. Nevertheless a lot of otherwise intelligent and well-educated men do go on believing or at least acting on such a belief. When they find the Bible's scientific references wrong, as they often are, they repudiate it utterly. Should a priest reject relativity because it

that it took perhaps ten thousand million years to create what we think is the universe. Genesis is simply trying to teach us that one day in seven should be devoted to rest, worship and reverence—all necessary to salvation."

"And that story about Jonah and the big fish?"

"I admit that a whale cannot

powers with which they are credited in the Bible.

"If scientific knowledge were necessary to salvation," he says, "it would have been revealed to the writers of the Scriptures and they would have set it down in their verses. For instance, the doctrine of the Trinity is much more abstruse than anything in relativity or

question of salvation. On other questions they were as wise or as ignorant as their generation. Hence it is utterly unimportant that errors of historic and scientific fact should be found in the Bible, especially if errors relate to events that were not directly observed by those who wrote about them. The idea that because they were right in their doctrine of immortality and salvation they must also be right on all other subjects is simply the fallacy of people who have an incomplete understanding of why the Bible was given to us at all.

Lemaître tells of a classroom scene in which he figured. An old father was expounding at the desk. Before him sat the lad who was to discover the expanding universe and who, even then, was brimful of science. In his eagerness the lad read into a passage of Genesis an anticipation of modern science.

"I pointed it out," says Lemaître, "but the old Father was skeptical. 'If there is a coincidence,' he declared, 'it is of no importance.' Also if you should prove to me that it exists I would consider it unimportant. It will merely encourage more thoughtless people to imagine that the Bible teaches infallible science, whereas the most we can say is that occasionally one of the prophets made a correct scientific guess."

THERE is, the abbé admits, a varying sense of conflict between science and religion in the different branches of science. "The biologists seem to have peculiar difficulties," he reasons. "There is every reason for this. They have only recently discovered a few guiding laws and principles. Hence, in the past their studies have been confusing rather than enlightening. In a way their subject-matter has been gross.

"But give the astronomer a new spirit is bound to weaken. The sense that this is a morally ordered universe will be incited. As soon as any science passes the mere stage of description it becomes a true science. Also it becomes more religious. The mathematicians, the astronomers and the physicists, for example, have been very religious men, with a few exceptions. The deeper they penetrated into the mystery of the universe the deeper was their conviction that the power behind the stars and behind the electrons of atoms is one of law and goodness."

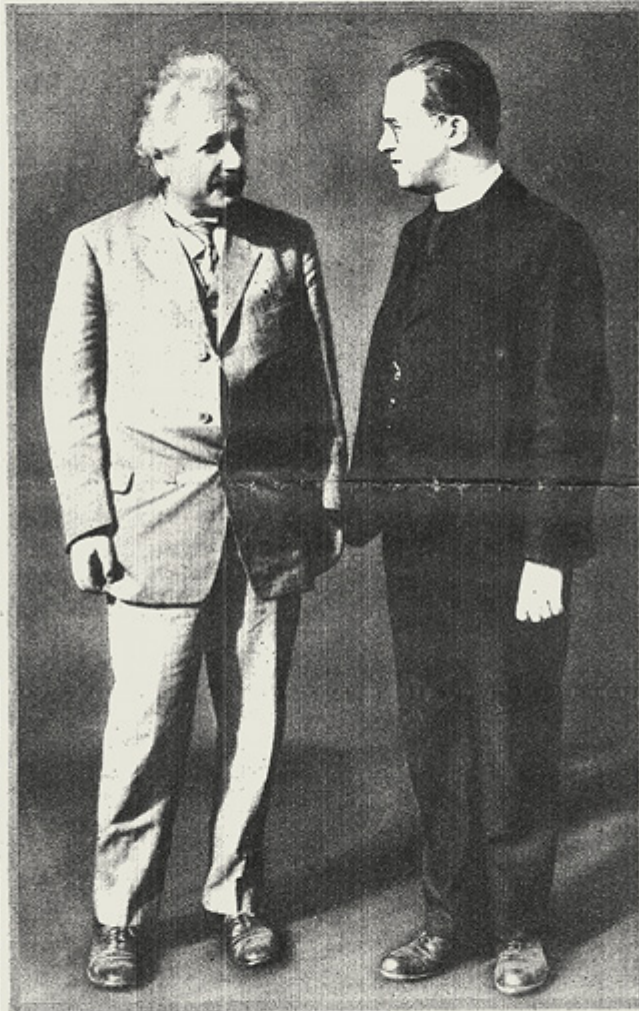
The real cause of conflict between science and religion is to be found in men and not in the Bible or the findings of physicists. "When men were told that they had the right to interpret the Bible's teachings according to their own lights," he holds, "naturally some were bound to decide that its science was infallible and others that it did not agree with modern instrumental measurements and was proof of opposite doctrines. The conflict has always been between those who fail to understand the true scope of either science or religion. For those who understand both, the conflict is simply about descriptions of what goes on in other people's minds."

As a priest Lemaître bows to the Catholic principle of leaving the interpretation of the Bible to the church. But this is good science, too, in his view. "The church has always been aware that the Bible teaches salvation, not science," he insists again. "Although the church's sense of the separate fields of science and religion has unquestionably developed through the ages, its fundamental recognition of the separate but intrinsically harmonious objects of both science and religion has always spared Catholic scientists such confusion."

"And Galileo?" you hint in the hope of tripping him up.

"Oh, Galileo was mildly dis-

(Continued on Page 18)



Einstein and Lemaître—"They Have a Profound Respect and Admiration for Each Other."

contains no authoritative exposition of the doctrine of the Trinity?"

"If the Bible does not teach science, among other things, what does it teach?" you ask.

"The way to salvation," comes the reply. "Once you realize that the Bible does not purport to be a textbook of science, the old controversy between religion and science vanishes."

"But the Bible says that creation was accomplished in six days," you protest. "Isn't that a direct, literal statement?"

"What of it?" retorts the abbé. "There is no reason to abandon the Bible because we now believe

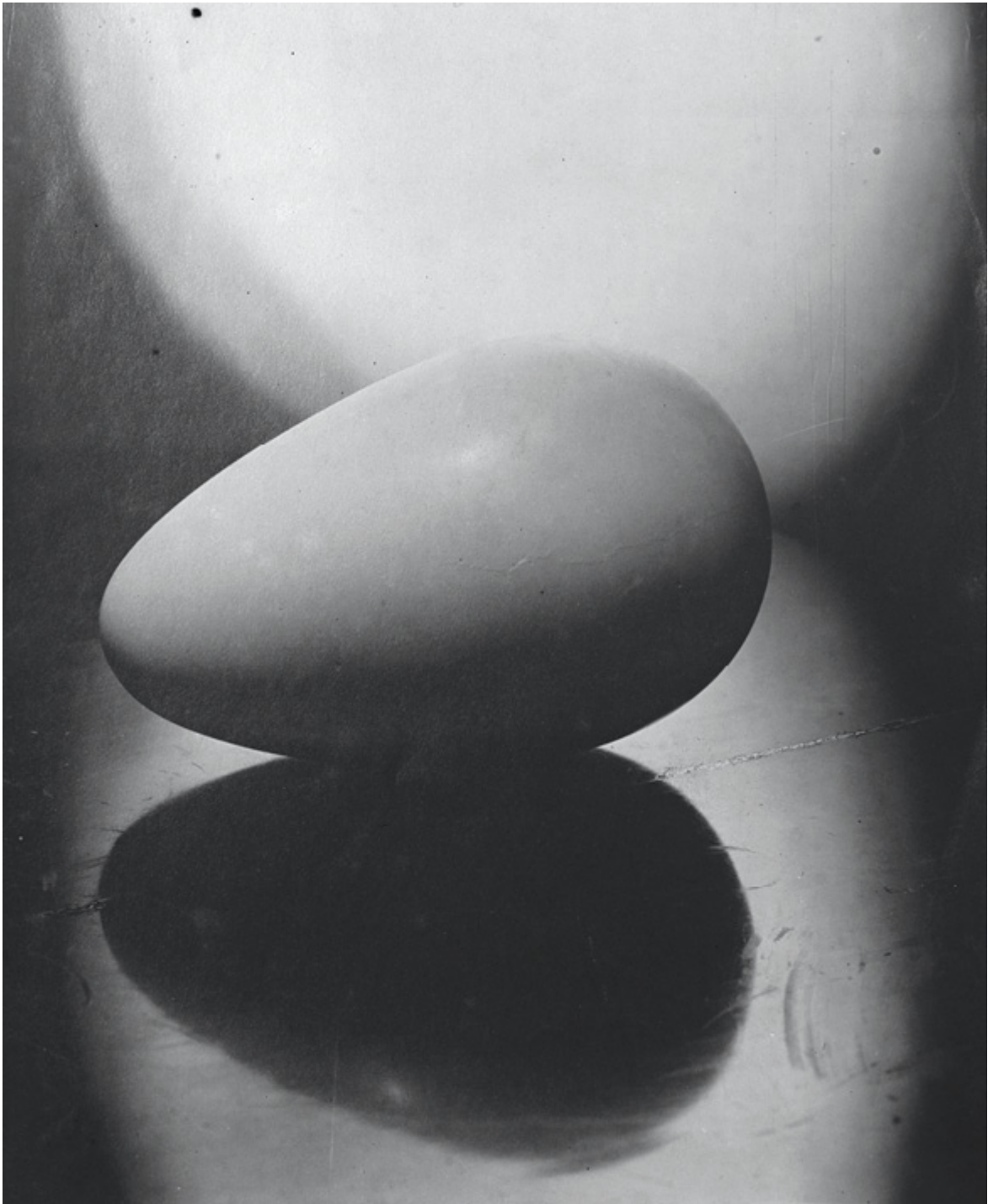
swallow a man and that a whale could not survive the swallowing of a man whole. But what of it? The real lesson is that by faith and righteousness a good man may attain security and salvation whatever his perils may be."

Like Eddington, the abbé believes that some things are imparted to us by revelation. There is no reasoning about the process. There is a lifting of a veil. The means of expressing what is revealed are often faulty, but the truth is there for all that.

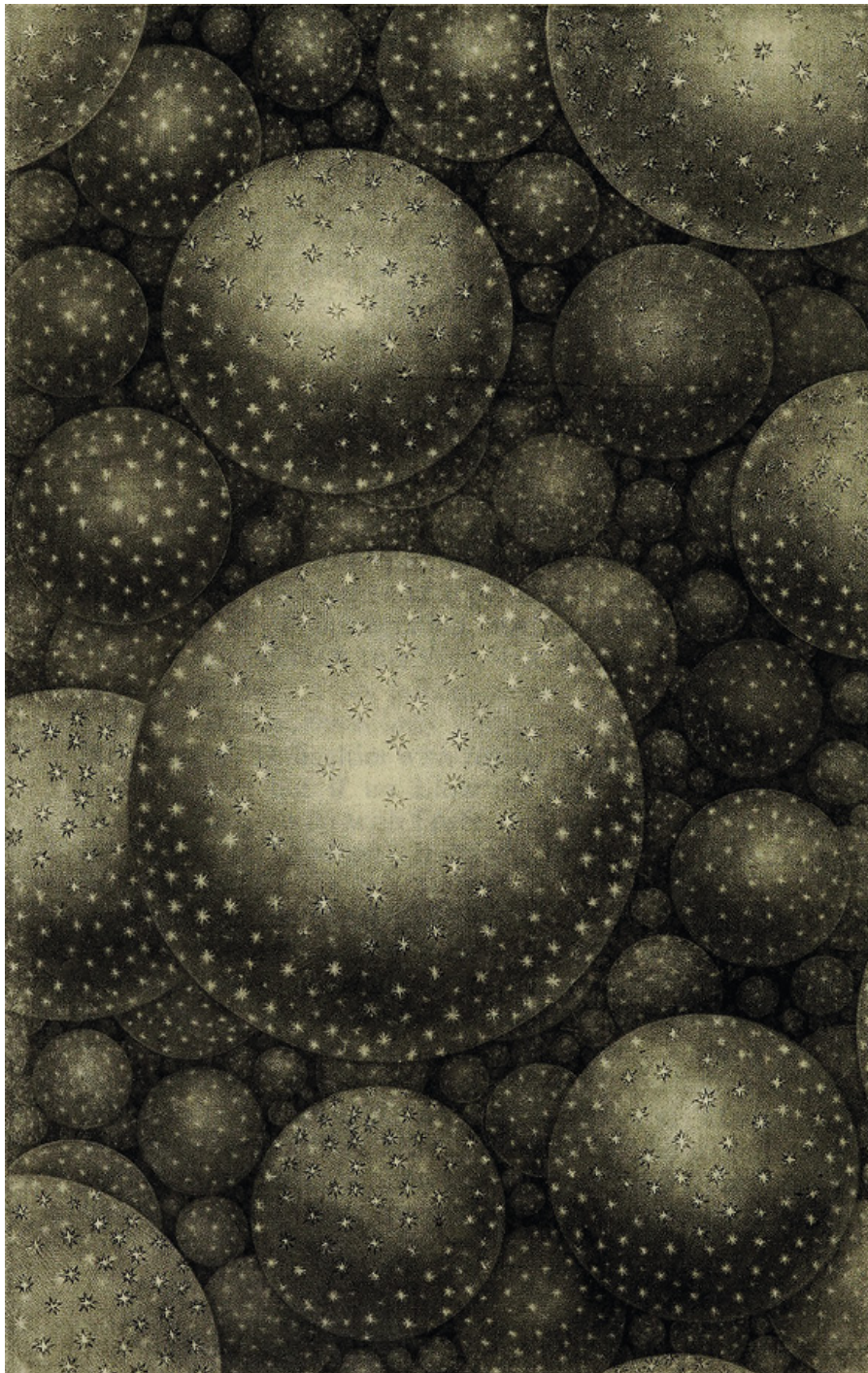
So strongly is Lemaître of this opinion that he is willing to attribute to the prophets all the

quantum mechanics. But, being necessary to salvation, the doctrine is stated in the Bible. If the theory of relativity had also been necessary to salvation it would have been revealed to St. Paul or Moses. Even though handicapped by the lack of a terminology and the necessary equations, all the result of an evolution that has been going on for centuries, either would have made some stumbling effort to expound it.

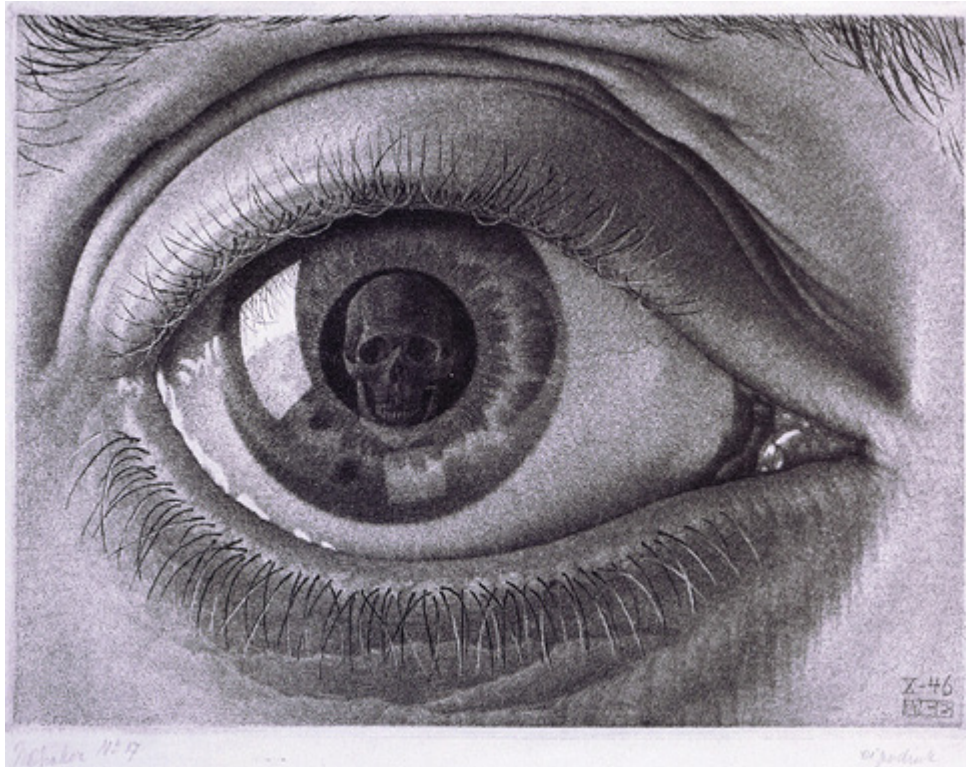
"As a matter of fact neither St. Paul nor Moses had the slightest idea of relativity. The writers of the Bible were illuminated more or less—some more than others—on the



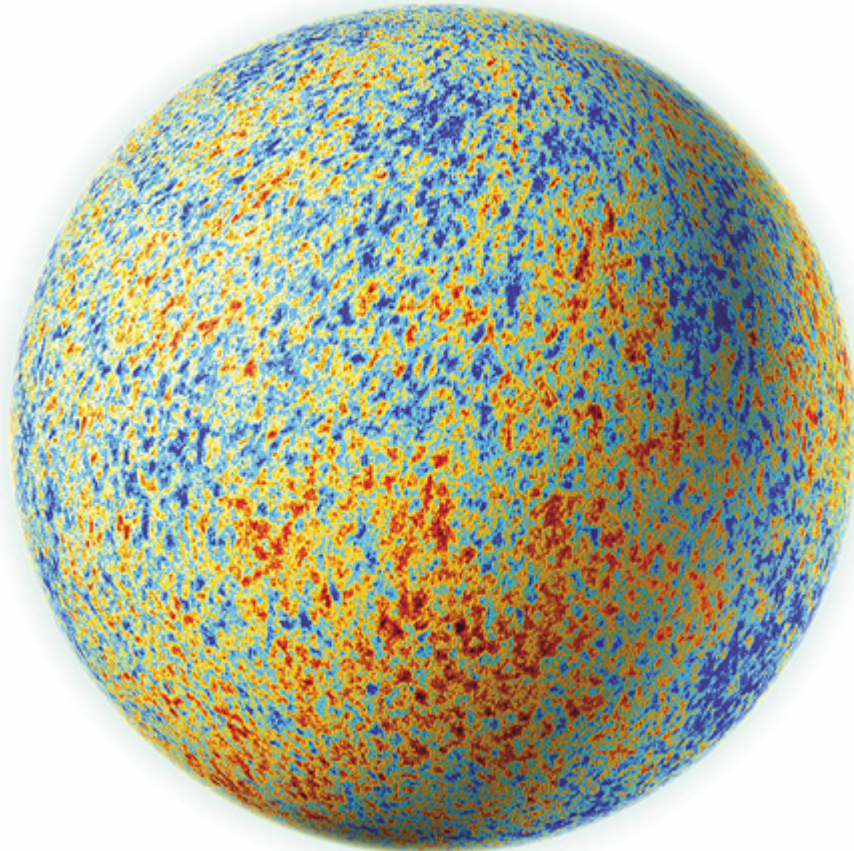
Fot. 6. Początek świata rumuńskiego rzeźbiarza Constantina Brâncușiego (1920) jako abstrakcyjne, ponadczasowe jajo.



Fot. 7. Ilustracja pochodząca z dzieła *Nowatorska teoria wszechświata* (1750) Thomasa Wrighta, który wyobraził sobie nieskończony wszechświat wypełniony galaktykami „tworzącymi bezkresny ogrom... na podobieństwo Drogi Mlecznej”. Jeśli zastąpimy galaktyki wszechświatami wyspowymi, obraz Wrighta przypomina dzisiejszą teorię multiświata, w której nieustannie powstają nowe wszechświaty wyspowe. Jaki rodzaj wszechświata wyspowego powinien być nasz?



Fot. 8. Oko autorstwa Mauritsa Cornelisa Eschera przypomina nam o ludzkiej skończoności. Znajdujemy się zawsze wewnątrz wszechświata, spoglądając na niego i w nim, lecz nigdy spoza niego.



Fot. 9. Temperatura relikтового kosmicznego mikrofalowego promieniowania tła (CMB), docierającego z różnych kierunków w przestrzeni do Ziemi leżącej w samym środku tej kuli. To promieniowanie reszkowe tworzy wokół nas sferę będącą fotografią wszechświata wykonaną zaledwie 380 tysięcy lat po Wielkim Wybuchu. Ta sfera CMB wyznacza także nasz kosmologiczny horyzont: głębiej nie możemy już zajrzeć.



Fot. 10. Ta tablica wisiała w gabinecie Stephena Hawkinga na Uniwersytecie w Cambridge. Była pamiątką po zorganizowanej przez niego w 1980 roku konferencji na temat supergrawitacji. Wczesny Stephen ogłosił supergrawitację jako potencjalną teorię wszystkiego.



Fot. 11. Stephen w swoim gabinecie w Cambridge w 2012 roku, w okolicach siedemdziesiątych urodzin. W tle widać „drugą tablicę” z pierwszymi obliczeniami autora, które doprowadziły nas do uznania wszechświata za hologram. Późniejszy Hawking uważał, że teoria wszechświata i obserwacja są ze sobą powiązane na głębszym poziomie. Tworzymy wszechświat tak samo, jak wszechświat tworzy nas.