

MICHAŁ HELLER

**KOSMOLOGIA
KWANTOWA**

WARSZAWA 2001

ISBN 83-7255-054-9

SPIS RZECZY

Wstęp

1 Czy współczesna fizyka jest chora na schizofrenię?

Stulecie fizyki

Rozdwojenie jaźni i strategia przybliżeń

W erze Plancka

2 Względność i kwanty

Teorie i eksperymenty

Czasoprzestrzeń

Geometria przestrzeni Hilberta

Geometria czasoprzestrzeni

Obserwable

3 Jak teoretycy traktują Wszechświat?

Epoka Plancka

Ostateczny akcelerator

Co to jest model kosmologiczny?

Modele Friedmana³⁷

Co wolą obserwatorzy, a co teoretycy?

4 Kwantowanie kanoniczne

Program kanonicznego kwantowania

Przestrzeń stanów i kwantowanie

Geometrodynamika Wheelera

Kwantowy świat Wheelera-DeWitta

Trudności i perspektywy

5 Ku jedności

Jedność w wielości

Unifikacja oddziaływań

Siły i symetrie

Supersymetria I superunifikacja

Supergravitacja

Superstruny

6 Wszechświat Hawkinga

Parowanie czarnych dziur

Czasoprzestrzenne tuby

Kwantowe stworzenie Wszechświata
Bez warunków brzegowych i początkowych

7 Wszechświat i instantony

Program badawczy Hawkinga

Instanton i inflacja

Inflacja w otwartym wszechświecie

Fluktuacje i struktura Wszechświata

8 Teoria M

Ocean struktur

Struny i superstruny

Świat wielkich wymiarów

Odkrywanie Masywu

9 Ekpyrotyczny wszechświat

M-teoria i kosmologia

Założenia modelu

Scenariusz początku

Chwila na refleksję

10 Struktura początku i końca

Rywale

O entropii geometrycznej

Entropia I Wszechświat

Entropia czarnych dziur

Termodynamika w pracowni Pana Boga

Struktura osobliwości

Kwantowa teoria grawitacji

Pod prąd

11 Nieprzemienny wszechświat

Gdzie szukać?

Nieprzemienność i jej następstwa

Nieprzemienne modele

Bezczasowa fizyka

Przyczynowość

Nieprzemienny wszechświat

12 Od superstrun do geometrii nieprzemiennej

Zero-brany

Piana czasoprzestrzeni i jeszcze dalej

Próba scenariusza

Paradoks horyzontu i inne trudności

Zakończenie: w erze Plancka fizyka spotyka się z filozofią

Bibliografia

Indeks

WSTĘP

Wyraz „wstęp” jest znaczeniowo rozmyty. Może znaczyć wstęp-wejście, na przykład „Wstęp wzbroniony”, lub wstęp-wprowadzenie, chociażby wstęp do książki. Ale obydwie te znaczenia mają ze sobą coś wspólnego: odwołują się do jakiegoś wejścia, do drzwi, które dokądś prowadzą; zapraszają do przejścia przez nie lub - przeciwnie - zakazują wstępu. Ja, oczywiście, zapraszam Czytelnika, by wszedł. Wejście prowadzi na taras widokowy, z którego można podziwiać niezwykle panoramę. Ale nie jest to panorama w stanie gotowym - jak pasmo górskie rozciągające się na linii horyzontu: wystarczy tylko lekko odwrócić głowę, by móc kontemplować inny jego fragment. Raczej jest to coś w rodzaju panoramicznego filmu, i to z nie do końca ustalonym scenariuszem. Akcja dopiero się tworzy. W jakim pójdzie kierunku? - w dużej mierze zależy to od dotychczasowej drogi.

U wejścia na taras nie ma więc tabliczki z napisem „Wstęp wzbroniony”. Każdy jest mile widzianym gościem. Ale muszę ostrzec: kto boi się intelektualnego wysiłku, pewnej myślowej dyscypliny, niech raczej nie wchodzi. Poszukiwanie zbyt łatwych doznań na tym terenie może grozić logicznym chaosem i pomysłami, które prowadzą na manowce. Cała panorama, choć jeszcze w stanie dynamicznego rozwoju, opiera się na dążeniu do matematycznej precyzji. Właśnie to sprawia, że panorama Jest wyjątkowo piękna. Z chwilą gdy precyzja zostaje osiągnięta, umysł w jasnym - ale nie oślepiającym - świetle dostrzega harmonię i konieczność. Konieczność polega na tym, że jeśli postawi się jeden krok, to bardzo często natychmiast wiadomo, w jakim kierunku należy postawić krok następny.

Kolejne kroki układają się w logiczny ciąg, który jest w stanie zaprowadzić tam, gdzie zwykły wzrok nie sięga, i ukazać takie perspektywy, których istnienia dotychczasowy „zdrowy rozsądek” nawet nie podejrzewał.

Cała panorama jest również dlatego tak wstrząsająco piękna, że u jej podstaw kryje się poszukiwanie zrozumienia - zrozumienia najbardziej fundamentalnego: Dlaczego Wszechświat jest, jaki jest? Jak myśmy się w nim znaleźli? Jaka Jest nasza w nim rola? Na pytania te nie znamy dziś pełnej odpowiedzi - to prawda; ale potrafimy je, zwłaszcza pierwsze z nich, przetłumaczyć na wiele bardziej szczegółowych pytań i na niektóre z tych pytań odpowiedzieć już całkiem sensownie. Pytania niezupełnie jeszcze jasne także mają swoje znaczenie. Może już wkrótce i one zaczną poddawać się naszej poznawczej pasji.

Chęć rozumienia jest w nas tak potężna, że raz postawionych pytań nie da się już wycofać.

Chcąc zrozumieć podstawy Wszechświata, musimy zrozumieć podstawy fizyki. Problemem numer jeden współczesnej fizyki jest połączenie dwóch jej wielkich teorii:

ogólnej teorii względności i mechaniki kwantowej. Ogólna teoria względności, czyli Einsteinowska teoria grawitacji, daje dobry obraz Wszechświata w jego wielkiej skali - w skali galaktyk, ich gromad i supergromad. Mechanika kwantowa pozwala zrozumieć Wszechświat na poziomie atomowym i subatomowym, czyli na poziomie elektronów, protonów, kwarków i gluonów. Ale obydwie te teorie dotychczas funkcjonują niezależnie od siebie i posługują się matematycznymi metodami, które diametralnie różnią się od siebie. A przecież Wszechświat wymagający zrozumienia jest jeden i, co więcej, obie teorie niedwuznacznie sugerują, że na poziomie najgłębszym muszą się zjednoczyć: grawitacja powinna ujawnić swoje kwantowe oblicze, a metody kwantowe rozciągnąć się także na grawitację. Tym, czego szukamy, jest więc kwantowa teoria grawitacji.

Metody współczesnej mechaniki kwantowej są w znacznej mierze całościowe. W układzie kwantowym Jego części są ze sobą „spłecione” w taki sposób, że jedne wiedzą o drugich, nawet gdy są od siebie bardzo oddalone. Wyrażenie „spłecione” (entangled), pojawiające się w poprzednim zdaniu, nie jest figurą retoryczną, lecz terminem technicznym. Spłecenie układu kwantowego oznacza, iż Jest on całością do tego stopnia, że manipulacja jakąkolwiek jego częścią natychmiast odbija się na całości. I to bez względu na przestrzenne oddalenie: dwa fotony mogą tworzyć układ spłeciony nawet wtedy, gdy znajdują się na przeciwległych krańcach supergromady galaktyk. Jeżeli ta cecha mechaniki kwantowej (a Jest to jej cecha istotna) przetrwa zjednoczenie z ogólną teorią względności, to teoria kwantowej grawitacji musi być również kwantową kosmologią.

Kwantowy Wszechświat będzie „jeszcze bardziej jednością” niż Wszechświat obecnej kosmologii, opartej na Einsteinowskiej teorii grawitacji. Tytuł książki, którą obecnie przekazuję Czytelnikowi - Kosmologia kwantowa - nie został wybrany przypadkowo. Fundamentalna teoria fizyczna nie może nie być teorią Wszechświata.

Metoda fizyki odznacza się swoistą agresywnością. Nigdy nie zadowala się już osiągniętym wynikiem, lecz ciągle atakuje problemy, jakie nasuwa namysł nad logiką dotychczasowych wyników. Włoski filozof nauki, Evandro Agazzi, napisał kiedyś: „zadaniem naukowca jest poszerzanie granic nauki, ale nigdy ich przekraczanie”.¹ Poszerzanie granic nauki dokonuje się właśnie dzięki tej agresywności. Już rozwiązane problemy, stawiając coraz to nowe pytania, wywierają swojego rodzaju ciśnienie na dotychczasowe granice fizyki i - w miarę uzyskiwania odpowiedzi na przynajmniej niektóre z pytań - stopniowo wymuszają przesuwanie się tych granic. Teren pogranicza jest zawsze niespokojny. Tu metoda funkcjonuje na skraju swoich możliwości. Tu przebiega front badań naukowych, o włos graniczący z polem niezbadanych możliwości. Zagadnienia, Jakże się tu

porusza, są największym wyzwaniem i zwykle one niosą najbardziej prowokujący „ładunek filozoficzny”. Nic zresztą dziwnego - linia graniczna między tym, co już wiemy, a Wielkim Nieznanym zawsze była i będzie wezwaniem do głębszej refleksji.

A zatem sytuacja w dzisiejszej fizyce teoretycznej pod tym względem nie jest wcale wyjątkowa. Jeżeli czymś różnimy się od naszych poprzedników, to jedynie... zaawansowaniem w czasie. To właśnie upływ czasu sprawił, że mamy do rozwiązania trudniejsze problemy niż oni (ale też i wiemy od nich więcej) i że koszty uprawiania nauki wzrastają z kwadratem trudności. Wydaje się, że dziś sięgamy już granic finansowych możliwości. Doświadczenia, których wyniki mogłyby być istotnymi drogowskazami, wiodącymi ku kwantowej teorii grawitacji, są tak kosztowne, że obecnie ludzkość (nie tylko poszczególne państwa) nie może sobie na nie pozwolić. Pozostaje mieć nadzieję, że nie zawiedzie drugi - obok eksperymentowania - element metody naukowej, a mianowicie rozumowanie za pomocą matematycznych struktur. I - Jak zobaczymy - tę właśnie strategię obficie wykorzystuje się we wszystkich poszukiwaniach kwantowej grawitacji. Oczywiście, każda wskazówka empiryczna, choćby tylko pośrednia, jest na wagę złota. Nic więc dziwnego, że fizycy szukają takich wskazówek gdzie się tylko da. Nic przewodzią stanowi dla nich idea, że prawidłowości najgłębszego poziomu mogą mieć mierzalne następstwa w obszarze niskich energii, czyli w obszarze, który już dziś możemy poddawać doświadczalnej kontroli.

Ale takie niepełne korzystanie z metody eksperymentalnej jest związane z ryzykiem. Agazzi napisał, że naukowiec powinien poszerzać granice nauki, ale nie wolno mu ich przekraczać. Bo przekroczenie granicy nauki oznacza skok w ciemno, chwytanie się czegokolwiek i czarowanie oryginalnymi pomysłami, które z nauką nie mają już wiele wspólnego. Niestety, i takie zabiegi zdarzają się w polowaniu na teorię kwantowej grawitacji. Dla niektórych stawka okazuje się zbyt wielką pokusą, by nie próbować sięgnąć po laur, nawet za cenę desperackich kroków. Historia fizyki niejednokrotnie przerabiała już tę lekcję. Plewy jednak zawsze, prędzej czy później, były oddzielane od ziarna.

Kosmologia kwantowa jest więc dziedziną otwartą. W przeciwieństwie do wielu innych działów fizyki nie ma w niej raz na zawsze ustalonych kanonów. Owszem, istnieją pewne mody i preferencje, ale ciągle jeszcze są one ustalane raczej przez to, co robią prestiżowe ośrodki, niż przez jakieś bardziej obiektywne kryteria. Nic więc dziwnego, że w tej sytuacji książka, do której zapraszam Czytelnika, nie może rościć sobie pretensji do kompletności. Spośród wielu koncepcji i roboczych modeli wybrałem te, które - z jakichś powodów - wydały mi się atrakcyjne lub otwierające najciekawsze perspektywy. Sądzę, że

mimo tak subiektywnych kryteriów panorama, do jakiej zapraszam Czytelnika, ukaże mu w miarę reprezentatywny obraz stanu badań w tym fascynującym obszarze współczesnej fizyki.

Książka ta ma jeszcze jeden aspekt - sprawozdanie z własnej Przygody. Dużą część mojej pracy w ostatnich latach pochłonęło zmaganie się z problemami kwantowej grawitacji.

Często w gronie fizyków słyszy się zdanie, że każdy, kto zajmuje się kosmologią, prędzej czy później „skończy w kwantowej grawitacji”. W moim przypadku zdanie to okazało się prawdziwe. I wcale tego nie żałuję. Zmierzenie się z problemem, o którym się wie, że Jest ważny, że - zapewne - jest najważniejszym z wszystkich problemów współczesnej fizyki, to wielkie życiowe doświadczenie. I pozostanie takim, choćby jedynym, co się w tej dziedzinie osiągnie, było zrozumienie tych kawałków drogi, którą już inni przeszli, i uświadomienie sobie, na czym polegają trudności. Nierozwiązane problemy też coś mówią: i o Wszechświecie, i o nas samych. Wszechświat wcale nie musi być przystosowany do naszych możliwości poznawczych, a my nieustannie powinniśmy uczyć się właściwych proporcji: człowiek nie jest miarą Wszechświata, lecz jego cząstką - zaniedbywalnie małą, ale subtelnie wpłątaną w najbardziej istotne powiązania kosmicznej struktury. Nie tylko Wszechświat jest wyzwaniem dla człowieka. Człowiek jest wyzwaniem dla samego siebie.

Wprawdzie o tych głęboko filozoficznych zagadnieniach niewiele napisałem w tej książce, ale są one w jakiś sposób obecne na wszystkich jej stronicach. Właśnie dlatego zajmowanie się kosmologią kwantową jest Wielką Przygodą. Do udziału w tej Przygodzie zapraszam Czytelnika.

Pasierbice, 26 stycznia 2001

ROZDZIAŁ 1

CZY WSPÓŁCZESNA FIZYKA JEST CHORA NA SCHIZOFRENIĘ?

Stulecie fizyki

Nasze stulecie było (już można o nim pisać w czasie przeszłym) stuleciem fizyki. Pierwsze wybuchy bomb atomowych, pierwsze loty satelitarne, lądowanie na Księżycu, rewolucja elektroniczna - to hasła wywoławcze naszych czasów, a wszystkie one nie są niczym innym, jak tylko zastosowaniami teorii fizycznych. Są to oczywiście zastosowania najbardziej spektakularne, ale nie brak także i wielu innych, takich, które niewidocznie wciskają się w nasze życie - nie zdajemy sobie nawet sprawy z tego, od jak wielu fotokomórek, przełączników i elektronicznych urządzeń zależy nasze codzienne funkcjonowanie.

Stają się one nieodłączną częścią naszej kultury - czy potrafilibyśmy sobie wyobrazić dzisiejszy świat bez radia, telewizji i taśm wideo? A to jeszcze nie wszystkie i wcale nie najważniejsze rzeczy. Jakże daje fizyka. Sądzę, że najdonioślejszym darem fizyki jest dar rozumienia świata. Coś znacznie więcej niż rozpoznanie jego części składowych - od kwarków do supergromad galaktyk - czy rozszerzenie katalogu znanych praw przyrody. Wyobrażenie o tym, czym jest rozumienie, jakie przynosi fizyka, daje znane powiedzenie Einsteina, który nie zawahał się twierdzić, że uprawia fizykę po to, by zrozumieć zamysł Bóży (the Mind of God), jaki Bóg miał, stwarzając Wszechświat.

Jeżeli fizyki nie nazywamy dziś królową nauk, to tylko dlatego, że światem już nie rządzą koronowane głowy.

Fizykę XX wieku zdominowały jej dwie wielkie teorie: mechanika kwantowa i ogólna teoria względności. Ich powstanie można śmiało zaliczyć do największych naukowych osiągnięć wszystkich czasów. Pojęcie kwantu, pierwszy sygnał rodzenia się nowej teorii (nazwanej później mechaniką kwantową), pojawiło się dokładnie w 1900 roku. Wprowadził je do fizyki Max Planck w celu rozwikłania pewnych trudności, z jakimi borykała się fizyka klasyczna, chcąc wyjaśnić zjawisko promieniowania ciała doskonale czarnego. Fakt ten zapoczątkował ciąg badań - zarówno teoretycznych, jak i doświadczalnych - w który zaangażowanych było wielu wybitnych uczonych, - - który, w latach dwudziestych, doprowadził do sformułowania mechaniki kwantowej już w dojrzałej postaci. Natomiast ogólna teoria względności była dziełem jednego człowieka - Alberta Einsteina. Wkrótce po stworzeniu w 1905 roku szczególnej teorii względności, czyli fizycznej teorii czasu i przestrzeni w układach odniesienia poruszających się względem siebie jednostajnie i prostoliniowo (zwanym układami inercjalnymi), Einstein zrozumiał, że teorię tę trzeba

rozszerzyć na dowolne układy odniesienia i że musi to być nowa teoria grawitacji. Kilka lat zmagania i twórczych wysiłków zostało uwieńczonych sukcesem: w roku 1915 równania pola grawitacyjnego ogólnej teorii względności ujrzały światło dzienne. Nowa teoria została ofiarowana nauce od razu w prawie ostatecznej postaci. Mimo że zapoczątkowała ona bardzo bogaty wątek badań, i to zarówno w fizyce, jak i w matematyce, praca fizyków teoretyków polegała głównie na wydobywaniu tego, co już się mieściło w równaniach Einsteina, a dzięki wysiłkom matematyków teoria względności przybierała jedynie coraz elegantszą postać. Chociaż trzeba także przyznać, że teoria ta, w dalszej perspektywie, otworzyła przed matematykami nowe światy, które do dziś penetrują oni swoimi metodami.

Obydwie te teorie całkowicie zmieniły pojęciowy szkielet współczesnej fizyki. Aż do ich powstania podstawowym dogmatem fizyków było przekonanie, że odkryta przez Izaaka Newtona mechanika, zwana mechaniką klasyczną, jest ostatnim słowem nauki. Oczywiście, można i należy ją rozwijać, ale w zasadzie jest ona teorią kompletną: wszystkie zjawiska, jakie kiedykolwiek zostaną odkryte, dadzą się ostatecznie zredukować do mechaniki i wyjaśnić za jej pomocą. W tym sensie świat jest niczym więcej, jak tylko wielką maszyną, posłuszną prawom mechaniki. Stworzenie w XIX wieku termodynamiki, czyli nauki o ciepłe, i wykazanie, iż jest ona w gruncie rzeczy zjawiskowym (fenomenologicznym) opisem, poza którym kryją się czysto mechaniczne oddziaływania wielkiej liczby cząstek, czyli że jest ona mechaniką statystyczną, mocno podbudowało wiarę fizyków w fundamentalne znaczenie mechaniki klasycznej. Ale już sformułowana przez Jamesa Derka Maxwella około połowy XIX stulecia teoria elektromagnetyzmu (zwana dziś elektrodynamiką klasyczną) była źródłem poważnych trudności dla mechanistycznego światopoglądu. Mimo licznych, niekiedy wręcz desperackich prób nie udało się zredukować praw elektromagnetyki do praw mechanicznych. Zaistniała sytuacja kryzysowa, z której wyjście znalazł dopiero Albert Einstein, tworząc swoją szczególną teorię względności.

Rozdwojenie jaźni i strategia przybliżeń

Dziś wiemy ponad wszelką wątpliwość, że mechanika klasyczna nie jest podstawową teorią świata. We współczesnej fizyce rolę tę spełniają mechanika kwantowa i ogólna teoria względności. Mechanika kwantowa jest odpowiedzialna za mikroświat cząstek elementarnych i fundamentalne oddziaływania z wyjątkiem grawitacji, tzn. oddziaływanie elektromagnetyczne oraz oddziaływania elektroslabe i jądrowe silne; ogólna teoria względności rządzi grawitacją i Wszechświatem w jego największej skali. Obie te teorie spełniają swoje funkcje znakomicie. Do niedawna uważano, że mechanika kwantowa (wraz z kwantową teorią pola) jest najlepiej sprawdzoną doświadczalnie teorią fizyczną; ostatnio

jednak dokładność tę przewyższyły obserwacje podwójnego pulsara o numerze katalogowym PSR 1913+16, który emituje fale grawitacyjne zgodnie z przewidywaniami ogólnej teorii względności, tym samym potwierdzając ją z niewiarygodną dokładnością, wynoszącą 1:1012.

Ale tu właśnie zaczynają się kłopoty. Całe nasze poczucie racjonalności buntuje się przeciwko temu, żeby istniały dwie teorie podstawowe. Świat jest jeden i powinien istnieć tylko jeden, spójny zestaw rządzących nim praw, czyli jedna teoria fundamentalna, która by te wszystkie prawa łączyła w jedną sieć logicznych wyników. Dotychczas takiej teorii nie odkryliśmy. Co więcej, obrazy świata, kreślone przez ogólną teorię względności i mechanikę kwantową, są drastycznie różne, a matematyczne struktury tych teorii nie przystają do siebie.

Świat relatywistyczny jest dokładny i geometryczny; świat kwantów niezdeterminowany i probabilistyczny.

Czyżby świat współczesnej fizyki był schizofreniczny, cierpiał na rozdwojenie jaźni? Jak żyć w takim „rozdwojonym” świecie? Nasze ciało składa się z miliardów cząstek elementarnych i choć jest ono dużo mniejsze od przeciętnej gwiazdy, wyznacza nam miejsce we Wszechświecie: jesteśmy obiektami makroskopowymi. Strukturę komórek i łańcuchów białkowych, z jakich się składamy, ostatecznie określają prawa fizyki kwantowej, ale w kształtowaniu naszej biologicznej postaci niemałą rolę odgrywa siła ciężenia, nie mówiąc już o tym, że Ziemia swoje fizyczne istnienie i najważniejsze cechy zawdzięcza polu grawitacyjnemu Słońca. Znajdujemy się więc niejako na pograniczu tych dwu schizofrenicznie oddzielonych od siebie światów współczesnej fizyki, a mimo to nasz makroskopowy obszar funkcjonuje bez żadnych widocznych zaburzeń. Jest to możliwe dzięki bardzo przemyślanej strategii, jaką stosują obie nie chcące porozumieć się ze sobą teorie. We wzorach mechaniki kwantowej występuje stała, zwana przez fizyków stałą Plancka i oznaczana przez h . Jest ona odpowiedzialna za wiele cech tej teorii, które decydują o jej specyficznym charakterze.

Gdyby wartość stałej Plancka wynosiła zero, nie byłoby żadnego problemu, mechanika kwantowa w ogóle by nie istniała.

Wszystkie jej wzory redukowałyby się do wzorów teorii Newtona. Ale stała Plancka nie jest równa zero i mechanika kwantowa istnieje! Z bardzo precyzyjnych pomiarów wynika, że $h = 6,62618... \times 10^{-34}$ Js (dżul razy sekunda). Na szczęście (dla nas!) jest to wartość mała, tak mała, że w makroskopowej skali, w której istnieją nasze ciała, składające się z miliardów cząstek, możemy ją praktycznie zaniedbać. I właśnie dlatego żyjemy w Newtonowskim świecie! Ściśle rzecz biorąc, jest to świat kwantowy, ale tak mało odmienny od

Newtonowskiego, że nasze „grube zmysły” różnicy tej nie zauważają.

Analogiczną strategię stosuje ogólna teoria względności. Jak już wiemy, jest to teoria grawitacji, a więc tej siły, która kształtuje Wszechświat w jego największej skali i jest najbardziej intymnie związana z jego historią i geometrią. Według teorii Einsteina pole grawitacyjne jest niczym innym, jak tylko geometrią czasu i przestrzeni. Potrafi ono zmieniać strukturę przestrzeni i wyginać czas. A przecież niczego podobnego w życiu codziennym nie obserwujemy. Przestrzeń jest sztywną sceną, podlegającą geometrii Euklidesa, a czas nieubłaganie płynie jednokierunkowo, bez względu na cokolwiek zewnętrznego.

Dzieje się tak, ponieważ pola grawitacyjne, które kształtują nasze makroskopowe środowisko, są słabe, a dla słabych pól grawitacyjnych wzory ogólnej teorii względności przechodzą w stare wzory Newtonowskie.

Życie w schizofrenicznym świecie współczesnej fizyki jest możliwe tylko dzięki tej strategii przybliżeń. Potrafimy sobie dość łatwo wyobrazić, co by się stało, gdyby obie podstawowe teorie współczesnej fizyki nie miały własności „gładkiego przechodzenia w fizykę makroskopową”. Po prostu w ogóle by nas nie było. Nasze organizmy i inne ciała makroskopowe są złożonymi, a mimo to względnie stabilnymi układami fizycznymi (ostatecznie umierają i słońca, i ludzie) Jedynie dlatego, że zarówno Einsteińska teoria grawitacji, jak i fizyka kwantowa, w obszarze, w którym się „przecinają”, dają jako swoje przybliżenie fizykę odkrytą w XVII wieku przez Newtona.

Ta sama strategia przybliżeń ma dla nas duże znaczenie poznawcze. Możemy mianowicie żywić nadzieję, że dzięki niej nasz świat - ten, w którym żyjemy - nie cierpi jednak na rozdzielenie jaźni. Nie da się bowiem wykluczyć, że i mechanika kwantowa, i ogólna teoria względności są również tylko przybliżeniami jakiejś jednej teorii, która naprawdę rządzi światem. Teorię tę nazywamy kwantową teorią grawitacji i poszukiwania jej stanowią jeden z głównych wątków współczesnej fizyki teoretycznej.

W erze Plancka Rodzi się jednak pytanie: czy kwantowa teoria grawitacji jest w ogóle potrzebna? Skoro strategia przybliżeń działa tak znakomicie, może po prostu świat jest warstwowy, w każdej warstwie działa inna teoria, a odpowiednie przechodzenie jednych teorii w drugie sprawia, że cały mechanizm pozostaje dobrze zsynchronizowany i funkcjonuje sprawnie? Rzecz jednak w tym, iż w dziejach Wszechświata był taki okres, w którym mechanika kwantowa i ogólna teoria względności (w takiej postaci, w jakiej je obecnie znamy) nie mogły być ze sobą zsynchronizowane za pomocą strategii przybliżeń.

Wielkim osiągnięciem nauki XX wieku jest kosmologia relatywistyczna. Powstała ona w pierwszych dekadach naszego stulecia jako zastosowanie ogólnej teorii względności do

badania struktury i ewolucji Wszechświata w Jego największej skali. W drugiej połowie stulecia kosmologia zyskała bogatą bazę obserwacyjną (dzięki nowym technikom astronomii i radioastronomii), co pozwoliło opracować tzw. standardowy model kosmologiczny. Po raz pierwszy w historii fizyka dorobiła się „ram kosmologicznych”, które nie są już sztucznie do niej dobudowywane (jak to miało miejsce chociażby w przypadku kosmologii Ptolemeusza czy Newtona), lecz wynikają z konsekwentnego stosowania praw fizyki do dobrze obserwacyjnie spenetrowanego układu, jakim jest świat gromad i supergromad galaktyk.

Obraz świata wynikający ze standardowego modelu kosmologicznego jest już dziś dość powszechnie znany. Najbardziej charakterystyczną jego globalną cechą Jest rozszerzanie się Wszechświata: wszystkie galaktyki uciekają od siebie nawzajem z ciągle rosnącymi prędkościami. A zatem gdy cofamy się w czasie, Wszechświat staje się coraz gęstszy. W istocie gęstość materii (skądinąd także bardzo ważny parametr kosmologiczny, por.rozdział 3) można przyjąć za swoisty zegar, odmierzający historię Wszechświata. Przez większą część tej historii ewolucja Kosmosu była sterowana przez oddziaływania grawitacyjne, a co za tym idzie, rekonstruując tę część jego historii, kosmologowie muszą korzystać z ogólnej teorii względności. Ale gdy na „kosmicznym zegarze” widniała gęstość równa 10^{93} g/cm³ (miało to miejsce bardzo blisko „początku”, zwanego Wielkim Wybuchem), sytuacja była drastycznie odmienna. Przy tak wielkich gęstościach materii pole grawitacyjne było tak silne (czyli krzywizna czasoprzestrzeni tak wielka), że - zgodnie z całą naszą znajomością fizyki - musiało ono ujawnić swoje kwantowe oblicze (inne oddziaływania fizyczne, na przykład elektromagnetyczne lub jądrowe, są znacznie silniejsze od grawitacji i dlatego o wiele łatwiej przejawiają swoją kwantową naturę). Wynika stąd, że w erze Plancka - bo tak fizycy nazywają epokę, w której gęstość materii wynosiła 10^{93} g/cm³ - ogólna teoria względności, czyli niekwantowa teoria grawitacji, nie mogła obowiązywać.

Rządy nad światem sprawowały wówczas zasady kwantowe, ale nie mogły to być znane nam dziś prawa mechaniki kwantowej, gdyż te z kolei zaniedbują grawitację, a w erze Plancka grawitacji w żadnym razie zaniedbać nie można. Ponieważ w erze Plancka świat jednak istniał, musiały nim rządzić jakieś prawa - prawa o charakterze kwantowym, ale odnoszące się również do grawitacji. A zatem teoria kwantowej grawitacji jest niezbędna. Kosmologia bardzo młodego Wszechświata musi być kosmologią kwantową.

ROZDZIAŁ 2

WZGLĘDNOŚĆ I KWANTY

Teorie i eksperymenty

Chciałem rozpocząć ten rozdział od stwierdzenia, że ogólna teoria względności i mechanika kwantowa różnią się pod dwoma względami: po pierwsze, rodzajem fizycznych zjawisk, do których się odnoszą; po drugie, matematycznymi strukturami, za pomocą których są wyrażane. Ale po namyśle rezygnuję z tego stwierdzenia. Jest ono co najmniej mylące. Teorie te różnią się tylko pod jednym względem: swojej fizycznej natury. To prawda, że fizyczną naturę każdej teorii poznajemy dzięki zabiegowi jej matematycznego modelowania, ale nie ma dwóch różnych rzeczy: jakiejś fizyki samej w sobie i jej matematycznego opisu. Dostępny nam Jest jedynie matematyczny model i za jego pośrednictwem to, co on modeluje, czyli pewien obszar fizyki. A eksperymenty? Czy dzięki nim nie mamy bezpośredniego dostępu do zjawisk fizycznych? Każdy dobry fizyk doświadczalny wie, że żadnego eksperymentu nie można przeprowadzić niezależnie od zmatematyzowanej teorii. Jest to słuszne w odniesieniu do wszystkich działów fizyki klasycznej, ale szczególnie jaskrawo rzuca się w oczy na terenie tak abstrakcyjnych teorii, jakimi są ogólna teoria względności i mechanika kwantowa. Obie te teorie dzięki swoim matematycznym strukturom odsłaniają tak głębokie warstwy świata, że nie mamy do nich bezpośredniego dostępu. To teoria musi nam powiedzieć, co mierzyć i jak zbudować aparat pomiarowy.

Można by nawet powiedzieć, że aparat pomiarowy jest czymś w rodzaju zmaterializowanej struktury matematycznej, częścią teorii przetłumaczoną na język pomiarów i jego całego technicznego obudowania. Również wyniki pomiarów mają niewiele wspólnego z gołymi faktami danymi nam przez naturę. Są to szeregi liczb lub wykresy funkcji (otrzymywane dziś najczęściej na wyjściach rozmaitych skomputeryzowanych urządzeń), które bez pomocy zmatematyzowanej teorii - o ile w ogóle byłyby możliwe do otrzymania (tryb warunkowy nierzeczywisty!) - nie miałyby żadnego znaczenia.

To zrośnięcie się (nieliniowe wymieszanie) zmatematyzowanej teorii ze zmatematyzowanym doświadczeniem jest głębokim wyrazem empiryczności współczesnej fizyki. Jedynie na wstępnych etapach rozwoju nauki może się wydawać, że doświadczenie to coś niezależnego od teorii - coś, co jest w stanie, samo w sobie, teorię ostatecznie potwierdzić lub obalić.

Nauki o wysokim stopniu empiryczności odznaczają się tym, że teoria i eksperyment przenikają się w nich wzajemnie.

Tak więc, nawiązując do początku niniejszego rozdziału, należy stwierdzić, że ogólna

teoria względności i mechanika kwantowa różnią się od siebie - i to drastycznie - pod względem swojej fizycznej natury. Gdy chcemy te różnice uchwycić, nie mamy innego wyjścia, jak tylko porównać ze sobą ich matematyczne struktury. To właśnie jest celem tego rozdziału.

Czasoprzestrzeń

Każda teoria fizyczna „rozgrywa się” w pewnej charakterystycznej dla niej przestrzeni i wcale nie musi to być przestrzeń w potocznym rozumieniu tego słowa, przestrzeń, w której - jak powiadamy - żyjemy. W tym sensie będziemy mówić o przestrzeni danej teorii. Geometryczna struktura tej przestrzeni wyznacza najbardziej podstawowe cechy teorii. Ogólna teoria względności i mechanika kwantowa są różnymi teoriami fizycznymi przede wszystkim dlatego, że rozgrywają się w całkowicie odmiennych przestrzeniach.

Przestrzenią ogólnej teorii względności jest czasoprzestrzeń.

Jest to fundamentalne stwierdzenie. Bernard Riemann na długo przed Einsteinem podejrzewał, że zakrzywienie przestrzeni może wiązać się z oddziaływaniami fizycznymi, ale podejrzenie to pozostało jałowe, dopóki Einstein w swoich poszukiwaniach nowej teorii grawitacji nie zrozumiał, iż to nie zakrzywienie przestrzeni, lecz zakrzywienie czasoprzestrzeni odpowiada polu grawitacyjnemu.

Przestrzeń jest zbiorem punktów, a każdy punkt identyfikuje się przez podanie trójki liczb, zwanych jego współrzędnymi w danym układzie współrzędnych. W innym układzie współrzędnych ten sam punkt identyfikuje się za pomocą innej trójki liczb (czyli współrzędnych tego punktu w nowym układzie współrzędnych). Musi wszakże istnieć reguła (układ równań), pozwalająca wyliczyć współrzędne danego punktu w nowym układzie, gdy znane są współrzędne tego punktu w układzie starym. Punkt w czasoprzestrzeni, zwany również zdarzeniem, definiuje się tak samo, z tą tylko różnicą, że identyfikuje się go nie poprzez trzy, lecz cztery współrzędne. Trzy z nich interpretuje się jako zwykłe współrzędne przestrzenne, a czwartą jako współrzędną czasową. Zdarzenie zatem określa punkt, w którym coś się zdarzyło (trzy współrzędne przestrzenne), i chwilę, w której to coś miało miejsce (współrzędna czasowa). Czasoprzestrzeń jest zbiorem wszystkich tego rodzaju zdarzeń.

Dla tak rozumianej czasoprzestrzeni buduje się geometrię zupełnie analogicznie jak dla zwykłej przestrzeni, wzbogaconą jedynie o dodatkowy, czasowy wymiar. Różnica ta nie jest jednak banalna: we wszystkich wzorach współrzędna czasowa różni się znakiem od współrzędnych przestrzennych. Możemy się na przykład umówić, że przy współrzędnej czasowej zawsze będzie znak minus, a przy współrzędnych przestrzennych - znak plus (ale umowa przeciwna także jest dopuszczalna; ważne tylko, by współrzędna czasowa i

przestrzenna różniły się znakiem ϵ by umowa była konsekwentnie stosowana). Ta mała różnica w znaku powoduje drastyczne różnice pomiędzy geometrią czasoprzestrzeni i geometrią zwykłej przestrzeni.

Najbardziej rzucająca się w oczy różnica polega na tym, że w czasoprzestrzeni istnieje pewna wyróżniona, nieprzekraczalna prędkość, którą w ogólnej teorii względności interpretuje się jako prędkość światła, podczas gdy w zwykłej przestrzeni takiej prędkości granicznej nie ma (lub, co na jedno wychodzi, prędkość taka jest nieskończona). Geometrię zwykłej przestrzeni matematycy nazywają geometrią Riemanna, a geometrię czasoprzestrzeni - geometrią Lorentza (lub pseudonemannowską).

Można krótko powiedzieć, że ogólna teoria względności jest fizycznie zinterpretowaną czterowymiarową (1 wymiar czasowy i 3 wymiary przestrzenne) geometrią Lorentza.

Geometria przestrzeni Hilberta

Przestrzeń, w której rozgrywa się mechanika kwantowa, ma zupełnie inną matematyczną strukturę. Podstawową „jednostką” mechaniki kwantowej nie są ani punkt, ani zdarzenie, lecz obiekt kwantowy. Może nim być cząstka fundamentalna, na przykład kwark, proton, elektron... lub układ bardziej złożony, chociażby atom wodoru. Z góry nie wiadomo, czy obiekty kwantowe istnieją w przestrzeni, czy też - dajmy na to - przestrzeń jest wynikiem oddziaływań pomiędzy obiektami kwantowymi. W każdym razie nie wiemy, jaką strukturę przypisać przestrzeni (lub czasoprzestrzeni) w tak małej skali, w jakiej istnieją obiekty kwantowe: czy jest ona ciągła, czy dyskretna?, płaska czy pokrzywiona?, gładka czy pełna załamań? Wiemy natomiast, że obiekty kwantowe mogą istnieć w różnych stanach. Gdy na przykład na atom wodoru padnie odpowiedni kwant energii, atom przechodzi ze stanu podstawowego do stanu wzbudzonego. Dlatego też fizycy teoretycy, chcąc zachować wierność temu, co można stwierdzić eksperymentalnie, skonstruowali przestrzeń, której punktami są wszystkie możliwe stany obiektu kwantowego. Nazywa się ją przestrzenią stanów (lub przestrzenią fazową) mechaniki kwantowej. Gdy fizycy zbadali własności tej przestrzeni, okazało się, że odpowiada ona przestrzeni, zwanej w matematyce przestrzenią Hilberta.

Mówiąc krótko, przestrzeń stanów mechaniki kwantowej jest przestrzenią Hilberta.

W tym popularnym szkicu nie mogę, oczywiście, podać ścisłej definicji przestrzeni Hilberta, postaram się jednak opisać tę przestrzeń w miarę poglądowo. A więc przede wszystkim przestrzeń Hilberta jest przestrzenią wektorową, lub inaczej liniową. Znaczy to, że elementami („punktami”) przestrzeni Hilberta są wektory, ale niekoniecznie należy

wyobrażać je sobie jako strzałki, a już w żadnym wypadku Jako strzałki „zaczepione” w różnych punktach znanej nam ze szkoły średniej przestrzeni Euklidesa. Do istoty wektorów należy to, że można je do siebie dodawać i mnożyć przez liczby (zespolone) i że działania te mają analogiczne własności do dodawania liczb i mnożenia liczb przez siebie. Ale nie każda przestrzeń wektorowa jest przestrzenią Hilberta. Aby nią była, musi spełniać trzy następujące warunki. Po pierwsze, każdemu wektorowi można przypisać wielkość, zwaną jego normą - gdybyśmy mimo wszystko chcieli wyobrazić sobie wektor Jako „odcinek ze strzałką”, norma odpowiadałaby długości tego odcinka. Po drugie, przestrzeń wektorowa musi mieć własność, którą matematycy nazywają jej zupełnością; jest to wymaganie raczej techniczne, zapewnia ono, że wykonując pewne działania w przestrzeni wektorowej, nie wyjdzie się poza tę przestrzeń. Po trzecie, musi się dać określić, kiedy dwa wektory są do siebie prostopadłe.

Jeżeli jakaś przestrzeń wektorowa spełnia te warunki, to jest ona przestrzenią Hilberta.

W mechanice kwantowej stan układu kwantowego reprezentuje wektor w przestrzeni Hilberta. A zatem stany (jako wektory w przestrzeni Hilberta) można mnożyć przez liczby (zespolone) i dodawać do siebie. Ściśle rzecz biorąc, mnożyć można nie stany, lecz reprezentujące je wektory.

Często jednak, celem uniknięcia skomplikowanych wypowiedzi, po prostu utożsamiamy wektory przestrzeni Hilberta ze stanami układu kwantowego. W dalszym ciągu będziemy chętnie korzystać z tej językowej konwencji, mając nadzieję, że nie doprowadzi to do pojęciowego zamieszania.

Pewien wektor reprezentuje jakiś stan obiektu kwantowego, to ten sam wektor pomnożony przez dowolną liczbę reprezentuje ten sam stan obiektu kwantowego. To, że przestrzeń Hilberta jest przestrzenią wektorową, ma podstawowe znaczenie dla mechaniki kwantowej i właśnie ten prosty fakt matematyczny decyduje o wielu „dziwnych” własnościach mechaniki kwantowej, które nie znajdują swoich odpowiedników ani w mechanice klasycznej, ani w ogólnej teorii względności.

Z tego, że przestrzeń Hilberta jest przestrzenią wektorową (liniową), wynika, że każdy wektor tej przestrzeni można przedstawić jako sumę innych wektorów tej przestrzeni; przy czym ażeby suma wektorów dała wektor wyjściowy, dodawane do siebie wektory należy pomnożyć przez pewne liczby zespolone. Taką sumę nazywa się kombinacją liniową wektorów. Tak więc każdy wektor w przestrzeni Hilberta można przedstawić jako kombinację liniową innych wektorów tej przestrzeni.

W języku mechaniki kwantowej znaczy to, że każdy stan obiektu kwantowego da się przedstawić jako kombinacja liniowa innych stanów (tzn. jako suma innych stanów z

zespolonymi współczynnikami). Innymi słowy, stany obiektów kwantowych nakładają się na siebie, dając stan wypadkowy. W fizyce klasycznej układ może być albo w jednym stanie, albo w innym stanie (coś trzeciego jest wykluczone); w mechanice kwantowej układ może znajdować się w superpozycji dwu lub więcej stanów (trochę w jednym, trochę w drugim stanie). Gdy w takiej sytuacji wykonamy pomiar, według mechaniki kwantowej istnieje pewne ściśle określone podobieństwo, że wykaże on, iż układ znajduje się w jednym stanie, i pewne ściśle określone prawdopodobieństwo, że układ znajduje się w drugim stanie (prawdopodobieństwa te są związane z liczbami zespolonymi, występującymi jako współczynniki w rozkładzie danego wektora na sumę tych dwu wektorów). W ten sposób prawdopodobieństwo staje się jednym z centralnych pojęć mechaniki kwantowej. Świat mechaniki kwantowej jest światem probabilistycznym.

Własności przestrzeni Hilberta mają swoje następstwa dla tego, co można obserwować w laboratorium. Na przykład wiązka elektronów przepuszczona przez dwa bliskie sobie otworki i padająca potem na ekran daje charakterystyczny obraz interferencyjny właśnie dlatego, że następuje nakładanie się stanów. Obraz taki nie mógłby się pojawić, gdyby ruchem elektronów rządziły prawa mechaniki klasycznej.

Warto zwrócić uwagę na bardzo interesującą sytuację, zresztą typową dla współczesnej fizyki teoretycznej: głębokie własności fizyczne są często prostym następstwem elementarnych prawidłowości matematycznych. W rozważanym tu przypadku elementarną własnością matematyczną jest liniowość przestrzeni Hilberta (czyli m.in. to, że każdy wektor tej przestrzeni może być przedstawiony jako kombinacja liniowa innych wektorów). Głęboką i zaskakującą własnością mechaniki kwantowej jest nakładanie się na siebie (superpozycja) stanów kwantowych. Drugie jest prostym następstwem pierwszego, polegającym na utożsamieniu stanów kwantowych z wektorami w przestrzeni Hilberta.

Nic podobnego nie pojawia się w czasoprzestrzeni ogólnej teorii względności. Wręcz przeciwnie, specyfika tej fizycznej teorii jest następstwem innego matematycznego faktu, tego mianowicie, że jest to teoria silnie nieliniowa.

Geometria czasoprzestrzeni

Wiemy już, że ogólna teoria względności jest teorią czasoprzestrzeni i jest również teorią grawitacji. W jaki sposób geometria czasoprzestrzeni łączy się z grawitacją? Wśród narzędzi geometrycznych istnieją też i takie, które pozwalają opisywać krzywiznę przestrzeni (na przykład krzywiznę powierzchni kuli). Zupełnie analogicznie można opisać zakrzywienie czasoprzestrzeni. Zakrzywienie to w ogólnej teorii względności utożsamia się z polem grawitacyjnym. Na pytanie: dlaczego planety poruszają się wokół Słońca po takich a nie

innych torach? ogólna teoria względności odpowiada, że Słońce zakrzywia wokół siebie czasoprzestrzeń, a planety obiegają je po „najprostszych krzywych” w tej zakrzywionej czasoprzestrzeni (krzywe takie nazywają się liniami geodezyjnymi albo krótko geodetykami; dla przykładu: na powierzchni globusa geodetykami są południki).

Istotną częścią matematycznej struktury ogólnej teorii względności są równania pola grawitacyjnego, zwane również równaniami Einsteina. Pozwalają one wyliczyć, jak określona konfiguracja materii zakrzywia czasoprzestrzeń. Równania te są silnie nieliniowe. Co to znaczy? Równanie nazywamy liniowym, jeżeli suma rozwiązań tego równania jest nowym jego rozwiązaniem. Równanie (lub układ równań) jest nieliniowe, jeżeli tej własności nie posiada. W takim równaniu rozwiązanie wypadkowe jest czymś więcej od sumy rozwiązań składowych. Gdy to „coś więcej” (nieliniowy naddatek) znacznie się różni od sumy rozwiązań składowych, mówi się, że równanie jest silnie nieliniowe. W tym właśnie sensie równania Einsteina są silnie nieliniowe. I ma to, oczywiście, swój odpowiednik w fizyce. Wyobraźmy sobie układ dwóch gwiazd, krążących wokół wspólnego środka masy. Każda z tych gwiazd wytwarza pole grawitacyjne (zakrzywia czasoprzestrzeń wokół siebie). Jakie jest ich wypadkowe pole grawitacyjne (sumaryczne zakrzywienie czasoprzestrzeni), czyli pochodzące od obydwu gwiazd? Okazuje się, że pole wypadkowe nie stanowi zwykłej sumy poszczególnych pól. Każde bowiem z dwu pól składowych jest źródłem nowego pola grawitacyjnego, nowe pole - źródłem kolejnego pola grawitacyjnego itd. W ten sposób powstaje pewna hierarchia nieliniowych naddatków; nie prowadzi ona jednak do żadnej nieskończoności, lecz w konkretnych sytuacjach daje konkretne wyniki liczbowe. Co więcej, dzięki nieliniowości pole wypadkowe jest nierozdzieloną całością; nie da się w nim jednoznacznie wydzielić pola pochodzącego od każdego ze składników oddzielnie.

Nieliniowość ogólnej teorii względności pozostaje w głębokim kontraście z liniowością mechaniki kwantowej. Wszelkie próby połączenia tych dwu teorii w jedną prowadzą do dylematu: czy zrezygnować z liniowości, czy z nieliniowości? Równania nie mogą być równocześnie liniowe i nieliniowe. Albo ogólna teoria względności, albo mechanika kwantowa musi zrezygnować z cechy, która dotychczas zapewniała tej teorii nieprzerwany ciąg sukcesów. Czy nie ma wyjścia z tego dylematu?

Obserwable

O sukcesach teorii decyduje zgodność jej przewidywań z wynikami eksperymentów. Te aspekty mechaniki kwantowej, które dotyczą jej przewidywań, są tak eleganckie z matematycznego punktu widzenia i tak zgodne z rzeczywistymi wynikami doświadczeń, że większość teoretyków sądzi, iż powinny one zostać wcielone - być może z pewnymi

niezbędnymi przystosowaniami - do przyszłej kwantowej teorii grawitacji.

Wielkości, które można mierzyć, takie jak położenie lub pęd elektronu, w mechanice kwantowej nazywają się obserwabliami. W aparacie matematycznym mechaniki kwantowej każdej obserwabli odpowiada operator działający na przestrzeni Hilberta. Operator taki, oznaczymy go przez A , jest wielkością matematyczną, która jeden wektor należący do przestrzeni Hilberta przeprowadza (przekształca) w inny wektor przestrzeni Hilberta, na przykład wektor $|p\rangle$ w wektor $|i\rangle$. Możemy to zapisać w postaci symbolicznej $A: |p\rangle \rightarrow |i\rangle$, co czytamy: operator A , działając na wektor $|p\rangle$, daje wektor $|i\rangle$.

Załóżmy teraz, że mamy obiekt kwantowy, który znajduje się w stanie $|p\rangle$, i chcemy zmierzyć pewną jego własność, czyli obserwablię, której odpowiada operator A . Działamy więc jakimś aparatem pomiarowym na obiekt kwantowy. Akt pomiaru zaburza ten obiekt. Chcąc na przykład wyznaczyć położenie elektronu, naświetlamy go wiązką fotonów (światła), co oczywiście wpływa na położenie elektronu. Zaburzenie takie oznacza przejście obiektu kwantowego ze stanu $|p\rangle$, w którym znajdował się dotychczas, w inny stan, na przykład $|i\rangle$. A zatem, z punktu widzenia teorii. Jest to zadziałanie operatorem A na wektor $|p\rangle$ i, w wyniku tego, otrzymanie wektora $|i\rangle$, czyli $A: |p\rangle \rightarrow |i\rangle$.

Operację tę opisuje pewne równanie (nazywa się je równaniem na wartości własne), którego rozwiązanie daje wyniki pomiaru. Ogromne sukcesy mechaniki kwantowej polegają na tym, że rozwiązania tego równania dla różnych obserwabli doskonale zgadzają się z rzeczywistością uzyskiwanymi wynikami pomiarów. Mechanika kwantowa właśnie dlatego nazywa się „kwantowa”, że równanie na wartości własne niektórych obserwabli, szczególnie ważnych dla tej teorii fizycznej, daje rozwiązania skwantowane, czyli przewiduje, iż wyniki pomiarów tych wielkości mogą przybierać tylko wartości dyskretne (nieciągłe). I tak jest w rzeczywistości; na przykład atom wodoru może znajdować się tylko w skwantowanych stanach energetycznych.

A jak wygląda problem obserwabli w ogólnej teorii względności? Jest to teoria świata w dużej skali. Wielkości obserwacyjne na ogół wylicza się dla obszaru kontrolowanego przez astronomię i radioastronomię, a informacje rejestrowane przez teleskopy i radioteleskopy są przynieszone z Wszechświata za pośrednictwem fal elektromagnetycznych. Chociaż oko ludzkie jest wrażliwe tylko na pewien zakres długości fal elektromagnetycznych (od około 3500 do około 7000 angströmów), fizycy często wszystkie fale elektromagnetyczne nazywają światłem.

Stosując się do tej konwencji, możemy powiedzieć, że informacje z Wszechświata otrzymujemy za pośrednictwem światła.

Jak już wiemy, w ogólnej teorii względności pole grawitacyjne przejawia się jako zakrzywienie czasoprzestrzeni. Światło natomiast - zgodnie z postulatami tej teorii - porusza się po „najprostszych krzywych” w zakrzywionej czasoprzestrzeni, czyli po liniach geodezyjnych. Chcąc rozszyfrować dane przynoszone nam przez światło z obiektów, do których odnoszą się prawa ogólnej teorii względności (na przykład od masywnych gwiazd w końcowych stadiach ich ewolucji), musimy rozwiązywać niekiedy trudne zagadnienia dotyczące geometrii unii geodezyjnych, czyli geometrii rozchodzenia się światła (lub „geometrii świetlnej”, jak niekiedy mówią fizycy relatywiści).

Zagadnienia te nie mają nic wspólnego z operatorami na przestrzeni Hilberta i są zupełnie innej natury niż rozwiązywanie równań na wartości własne.

Gdy jednak przejdziemy do obszarów, w których powinny wystąpić kwantowe efekty grawitacji (a więc do rozmiarów mniejszych niż 10^{-33} cm; (por. rozdział następny), geometria świetlna prawdopodobnie całkowicie się załamie i trzeba ją zastąpić jakimś formalizmem, który poradziłby sobie z kwantową naturą pola grawitacyjnego. Czy będzie to teoria operatorów na przestrzeni Hilberta? Teoria taka radzi sobie z kwantami, ale jest liniowa, więc czy poradzi sobie z polem grawitacyjnym? Jeżeli natomiast zrezygnujemy z liniowości, to nie może to być teoria operatorów na przestrzeni Hilberta. Wydaje się zatem, że powinniśmy szukać całkiem nowej matematyki. Ale gdzie jej szukać? Pytanie to jest tym trudniejsze, że nie możemy - w realistycznie odległej przyszłości - spodziewać się żadnych wskazówek ze strony doświadczeń. Energie potrzebne do tego, by spenetrować obszar kwantowej grawitacji, są tak ogromne, że może nimi swobodnie operować tylko literatura science fiction.

ROZDZIAŁ 3

JAK TEORETYCY TRAKTUJĄ WSZECHŚWIAT?

Epoka Plancka

Dla kwantowej teorii grawitacji decydująca jest skala. W dużej skali (na przykład porównywalnej z rozmiarami naszego ciała) pola grawitacyjne są słabe i nie przejawiają swojej kwantowej natury; w tym obszarze klasyczna teoria grawitacji Newtona sprawuje się wystarczająco dobrze (a nawet bardzo dobrze!).

W rozdziale 1 mówiliśmy o tym, że w bardzo wczesnych etapach ewolucji Wszechświata, kiedy Jego gęstość osiągała 10^{93} g/cm³ (tzw. gęstość Plancka), cały Kosmos znajdował się w „małej skali” i kwantowe efekty grawitacji musiały odgrywać decydującą rolę. Epokę tę nazwaliśmy epoką Plancka. Z równań kosmologicznych łatwo wyliczyć, kiedy gęstość Wszechświata równała się gęstości Plancka. Okazuje się, że miało to miejsce 10^{-44} s (tzw. czas Plancka), licząc od stanu, w którym gęstość Wszechświata byłaby (teoretycznie) nieskończona.

Stan ten kosmologowie teoretycy nazywają osobliwością początkową; obserwatorzy i popularyzatorzy wolą termin Wielki Wybuch. W dalszym ciągu o stanie tym będziemy mieli okazję mówić jeszcze bardzo wiele. Na razie przyjmijmy, że czas kosmiczny liczymy od osobliwości początkowej; a zatem przypiszemy jej „chwilę zero”. Znając czas, łatwo wyliczyć odległość, jaką światło przebedzie w tym czasie. Okazuje się, że dla 10^{-44} s odległość ta wynosi 10^{-33} cm (tzw. odległość Plancka).

Właśnie tymi trzema wielkościami charakteryzuje się epoka (albo próg) Plancka: gęstość 10^{93} g/cm³, czas 10^{-44} s, długość 10^{-33} cm (chodzi oczywiście tylko o rzędy wielkości).

Czy epokę Plancka należy umieszczać w zamierzchłej przeszłości, u zarania dziejów Wszechświata, jakieś 10 -15 miliardów lat temu (jak szacują kosmologowie obserwatorzy)? Oczywiście tak, ale... nie tylko. Rzecz w tym, że do ery Plancka można dojść nie tylko cofając się w czasie, lecz również drążąc w głąb. Możemy mianowicie penetrować coraz to mniejsze odległości. Jednakże by dotrzeć głębiej, trzeba zużyć więcej energii. W CERN-ie pod Genewą w słynnych doświadczeniach ze zderzającymi się wiązkami protonów uzyskano energię sięgającą 100 GeV (gigaelektronowoltów), co pozwoliło w maleńkiej objętości (wielkości główki od szpilki) odtworzyć warunki, jakie panowały we Wszechświecie 10^{-35} s po początkowej osobliwości. Do ery Plancka pozostało Jeszcze „tylko” 9 rzędów wielkości! Niestety, by eksperymentalnie pokonać te rzędy wielkości, musielibyśmy dysponować energią, do jakiej prawdopodobnie nigdy nie uzyskamy dostępu (choć w nauce nigdy nie

należy mówić „nigdy”). Ale od czego teoretycy i ich pomysły?! Sytuacja wygląda podobnie jak w geologii: pozostałości po dawno minionych epokach odkładają się w głębokich warstwach struktury Wszechświata. I wszystko wskazuje na to, że penetrując „warstwę Plancka” (przynajmniej teoretycznie), dowiemy się czegoś ważnego o fundamentach fizyki. Świadczy o tym także następujący ciekawy „zbieg okoliczności”. W fizyce są znane trzy fundamentalne stałe fizyczne: prędkość światła, oznaczana przez c - jest to stała ważna w elektrodynamice i szczególnej teorii względności; stała grawitacji (Newtonowska), oznaczona przez G - charakterystyczna dla teorii grawitacji (a więc i dla ogólnej teorii względności); oraz stała Plancka, oznaczona przez h - ściśle związana z mechaniką kwantową.

Otóż okazuje się, że gdy z tych stałych skonstruujemy wielkości o wymiarach gęstości, czasu i przestrzeni, otrzymamy wielkości równe (co do rzędu) gęstości Plancka, czasowi Plancka i długości Plancka. Czy jest to rzeczywiście tylko zbieg okoliczności, czy może raczej fundamentalne stałe fizyczne w jakimś sensie pamiętają erę Plancka? Fizycy na ogół nie wierzą w takie zbiegi okoliczności i zawsze na tym dobrze wychodzą.

Ostateczny akcelerator

Co zrobić, gdy brakuje pieniędzy na kosztowną inwestycję? Odpowiedź jest prosta: wymyślić coś tańszego. Tak też zrobili teoretycy. Skoro nie stać nas na wydatek energetyczny, który by nam pozwolił posunąć się głębiej o 9 rzędów wielkości i dotrzeć do warstwy Plancka, to... cofnijmy się w czasie i sięgnijmy do oryginalnej, pierwotnej ery Plancka. Oczywiście, możemy to zrobić tylko teoretycznie, ale możemy. Trzeba najpierw, wykorzystując odpowiednie teorie i obserwacje astronomiczne, zrekonstruować historię Wszechświata wstecz i do najwcześniejszych etapów tej historii zastosować nasze teoretyczne spekulacje dotyczące fizyki w epoce Plancka. Innymi słowy, należy umiejętnie połączyć równania kosmologiczne z różnymi modelami kwantowej grawitacji, a następnie zobaczyć, co z tego wynika. Oczywiście, posługując się również matematyczną dedukcją, to znaczy wyliczając, jakie wnioski obserwacyjne wynikają z naszego połączenia równań grawitacyjnych z równaniami kwantowej teorii grawitacji. Przy odrobinie szczęścia a uczeni zawsze liczą na szczęście - być może obserwacje astronomiczne potwierdzą niektóre z tych wniosków. Lub je obalą - obalanie swoich teoretycznych przewidywań fizycy także uważają za sukces. „Nie tędy droga” także jest wartościową informacją.

Podsumowując: jeśli prawdziwy akcelerator jest za kosztowny, potraktujmy Wszechświat jako rodzaj teoretycznego akceleratora. Ponieważ nie ma tu żadnej granicy osiągalnych energii, fizycy nazywają niekiedy Wszechświat „ostatecznym akceleratorem”.

W dalszym ciągu tego rozdziału przygotujemy się do tej strategii. W następnych

rozdziałach będziemy z niej obficie korzystać.

Co to jest model kosmologiczny? W jaki sposób kosmologowie teoretycy konstruują modele Wszechświata? Istnieją mocne - zarówno teoretyczne, jak i obserwacyjne - podstawy, by wierzyć, że struktura Wszechświata w największej skali jest kształtowana przez oddziaływania grawitacyjne. A zatem teorią, którą należy się posłużyć przy konstruowaniu modeli kosmologicznych, winna być teoria grawitacji - ogólna teoria względności. Pamiętajmy z poprzednich rozdziałów, że u podstaw tej teorii leży twierdzenie, iż pole grawitacyjne przejawia się jako zakrzywienie czasoprzestrzeni.

Należy tę ideę sprecyzować nieco dokładniej, czyli opisać ją w języku matematycznym. Czyni to równanie pola grawitacyjnego, zwane również równaniem Einsteina. Można je schematycznie przedstawić w następujący sposób: geometria, czasoprzestrzeni = stała*rozkład, materii.

Po lewej stronie tego równania znajduje się wyrażenie opisujące geometrię czasoprzestrzeni; po prawej - wyrażenie opisujące rozkład w czasoprzestrzeni wszystkiego, co może być źródłem pola grawitacyjnego (a więc mas, energii, pędów...). Skrótowo mówi się o „rozkładzie materii”, choć wyrażenie „materia” w fizyce nie jest zbyt jasno określone. Stała występująca po prawej stronie równania Einsteina jest swoistą „stałą sprzężenia”: sprzęga ona rozkład materii z geometrią czasoprzestrzeni. Stała ta jest związana ze stałą grawitacji Newtona i została tak dobrana, by dla słabych pól grawitacyjnych równanie Einsteina przechodziło w odpowiednie równanie teorii Newtonowskiego powszechnego ciężenia.

Konstruowanie modelu kosmologicznego polega na podstawieniu za rozkład materii po prawej stronie równania Einsteina wyrażenia, które w jakiś sposób opisuje rozkład materii w największej skali (a więc, powiedzmy, rozkład gromad i supergromad galaktyk), i rozwiązaniu tego równania. Otrzymamy w ten sposób odpowiedź na pytanie, jaka jest geometria czasoprzestrzeni w największej skali. Ponieważ chodzi tu o geometrię czasoprzestrzeni, odpowiedź na to pytanie zawiera w sobie informacje o ewolucji Wszechświata w czasie i jego przestrzennej strukturze.

Modele Friedmana

Teoretycy często bywają niecierpliwi. Nie czekając na dane, których powinni dostarczyć doświadczalnicy lub obserwatorzy, kierowani intuicją, czynią założenia, mające tymczasem zastąpić wyniki eksperymentów, na ich podstawie konstruują swoje matematyczne modele i... bardzo często trafiają w sedno. Bardzo często ex post obserwacje potwierdzają słuszność wyjściowych założeń. Jak opisać rozkład materii w największej skali? Trzeba by o to zapytać astronomów. Galaktyki łączą się w gromady; gromady galaktyk

wykazują tendencję do tworzenia supergromad. Wymagające czasu i dużych nakładów finansowych programy obserwacyjne winny ustalić, jak gromady i supergromady są rozłożone w przestrzeni. Dziś takie programy funkcjonują, ale w 1917 roku, kiedy Albert Einstein konstruował swój pierwszy model kosmologiczny, astronomowie nie byli jeszcze w pełni przekonani, że galaktyki (nie mówiąc o ich gromadach i supergromadach) w ogóle istnieją. Einstein więc i jego następcy zrobili to, co było najprostsze: założyli, że rozkład materii w przestrzeni jest, średnio rzecz biorąc, równomierny (Einstein mówił o równomiernym rozkładzie gwiazd, gdyż wówczas jeszcze nie wiedział o istnieniu galaktyk). Widocznie przyroda również chętnie wybiera najprostsze rozwiązania, bo dzisiejsze wyniki badań obserwacyjnych potwierdzają, że w skali supergromad galaktyk materia jest rzeczywiście, statystycznie rzecz biorąc, równomiernie rozłożona w przestrzeni.

Nie będziemy tu opisywać, w jaki sposób założenie (dziś już raczej wniosek z obserwacji) o równomiernym rozkładzie materii „wstawia się” do równania Einsteina. Wymagałoby to zbyt specjalistycznej wiedzy matematycznej. Dość wspomnieć, że po tym zabiegu równanie Einsteina drastycznie się upraszcza; do tego stopnia, iż stosunkowo łatwo je rozwiązać. W ten sposób uproszczone równanie Einsteina nazywa się równaniem Friedmana. Najogólniej mówiąc, równanie to określa ewolucję Wszechświata w czasie. Ma ono trzy rozwiązania (przy założeniu, że tzw. stała kosmologiczna równa się zero). Rozwiązania te, zwane kosmologicznymi modelami Friedmana, schematycznie przedstawia rysunek 3.1. Przyjrzyjmy się mu nieco dokładniej.

Chcąc dobrze odczytać wykres, taki jak na rysunku 3.1, musimy najpierw zwrócić uwagę na to, co oznaczają osie współrzędnych. Na naszej rycinie oś pozioma oznacza czas kosmiczny, tzn. czas, którym mierzymy historię Wszechświata.

I tu bardzo ważna uwaga. W ogólnej teorii względności czas kosmiczny nie musi istnieć. Zegary chodzą różnie w różnych układach odniesienia i wcale nie musi istnieć taki układ odniesienia, w którym zegar odmierzałby całą (od „początku” do „końca”) historię świata. Tak się jednak szczęśliwie składa, że równomierny rozkład materii we Wszechświecie powoduje, iż taki „globalny” układ odniesienia istnieje i pojęcia historii Wszechświata oraz kosmicznego czasu mają sens. Właśnie ten czas (oznaczony symbolem t) reprezentuje pozioma oś na rysunku 3.1.

Na osi pionowej odkładamy wielkość zwaną czynnikiem skali, oznaczoną przez R . Dla naszych potrzeb wystarczy, jeżeli wielkość tę będziemy utożsamiali z typową odległością pomiędzy galaktykami (lub gromadami galaktyk). Jeżeli czynnik skali jest mały, galaktyki są stłoczone, a Wszechświat - gęsty. Jeśli czynnik skali jest duży, galaktyki znajdują się daleko

od siebie i Wszechświat jest rozrzedzony.

Przyjrzyjmy się teraz samym rozwiązaniom. Jest ich trzy i każde przedstawia wszechświat z inną geometrią przestrzeni; odpowiednie nazwy są zaznaczone na rysunku. I tak jedno z rozwiązań przedstawia wszechświat z przestrzenią zamkniętą. Prototypem takiej przestrzeni jest powierzchnia kuli (z tą różnicą, że powierzchnia kuli ma 2 wymiary, a przestrzeń wszechświata - 3): podróżując w takiej przestrzeni ciągle przed siebie, po skończonym czasie wrócimy do punktu wyjścia.

Drugie rozwiązanie ukazuje wszechświat z przestrzenią płaską, w której obowiązuje zwykła geometria Euklidesa. Przestrzeń wszechświata, reprezentowanego przez trzecie rozwiązanie, nazywa się otwartą, gdyż - podobnie jak w przestrzeni płaskiej - podróżując wciąż przed siebie, nigdy nie wrócimy do punktu wyjścia; w przeciwieństwie do przestrzeni zamkniętej, która jest „wypukła” (ma krzywiznę dodatnią), przestrzeń otwarta jest „wklęsła” (ma krzywiznę ujemną).

Spróbujmy teraz odczytać z wykresów rozwiązań ich ewolucję w czasie. Początek ewolucji wszystkich trzech modeli kosmologicznych jest taki sam: w chwili $t = 0$ czynnik skali $R = 0$, czyli cała materia wszechświata znajduje się teoretycznie w jednym „punkcie”. To właśnie jest osobliwość początkowa.

W następnych chwilach R rośnie, wszechświat zaczyna się rozszerzać. Z początku tempo ekspansji we wszystkich trzech modelach jest mniej więcej takie samo, ale z czasem wyraźnie widać, że model otwarty rozszerza się najszybciej, a model zamknięty - najwolniej. W modelu zamkniętym ekspansja zwalnia, osiąga maksimum i zamienia się w kurczenie. Po skończonym czasie czynnik skali ponownie przyjmuje wartość zero - wszechświat znajduje się w stanie osobliwości końcowej.

W modelach płaskim i otwartym ekspansja zwalnia, ale nie zmienia się w kurczenie: wszechświat rozszerza się w nieskończoność, jego gęstość dąży do zera (ponieważ masa zawarta we wszechświecie pozostaje ta sama, ale objętość rośnie nieograniczenie).

Któryś z tych trzech modeli Friedmana dostarcza poprawnego opisu naszego Wszechświata w największej skali (oczywiście, tylko w pewnym przybliżeniu¹). Który z nich? Ponieważ na pewno żyjemy w fazie rozszerzania się (a nie kurczenia), pytanie to nie jest tak bardzo istotne. Informacje astronomiczne o Wszechświecie przynosi nam światło, które rozchodzi się ze skończoną prędkością, a więc informacje te czerpiemy z naszej przeszłości, a przeszłość we wszystkich trzech modelach Friedmana jest bardzo podobna. To daleka przyszłość różni te modele od siebie. W modelu zamkniętym koniec Wszechświata nastąpi przez zgniecenie w końcowej osobliwości, a w modelach płaskim i otwartym - przez

roztopienie w pustce. Rodzi się więc pytanie: czy potrafimy za pomocą obserwacji wyróżnić „scenariusz końca”? Co wolą obserwatorzy, a co teoretycy? W zasadzie istnieje możliwość udzielenia odpowiedzi na pytanie postawione na końcu poprzedniego paragrafu (jeżeli w dalszym ciągu utrzymamy założenie, że stała kosmologiczna jest równa zero). Decydującym parametrem jest gęstość materii we Wszechświecie. Model płaski jest bardzo wymagający: obecna gęstość materii we Wszechświecie musi być równa dokładnie ściśle określonej wartości; nazywamy ją gęstością krytyczną i oznaczamy przez ρ_{crit} . Jeżeli obecna gęstość materii ρ jest większa od ρ_{crit} - to Wszechświat musi być zamknięty. Oczywiście, dowodzi się tego matematycznie, ale można sobie pogładowo wyobrazić, że gdy $\rho > \rho_{crit}$ materii we Wszechświecie jest na tyle dużo i wytwarza ona tak silne pole grawitacyjne, iż zdoła ono wyhamować ucieczkę galaktyk i zamienić ją w powszechne kurczenie.

Gęstość krytyczna ρ_{crit} wynika z teorii, a więc powinna być określona dokładnie. Niestety, teoria powiada, że ρ_{crit} zależy od innej stałej, tzw. stałej Hubble'a, której wartość winniśmy wyznaczyć z obserwacji. Ponieważ wartość tej stałej znamy tylko z pewną dokładnością, możemy jedynie ustalić rząd wielkości gęstości krytycznej; z obliczeń wynika, że $\rho_{crit} \sim 10^{-29}$ g/cm³.

A jaka jest obecna gęstość Wszechświata? Trudno ją oszacować, ponieważ nie wszystko, co wypełnia Wszechświat, musi się świecić (co więcej, rozważania teoretyczne mówią, że w Kosmosie istnieje dużo ciemnej materii). Dotychczasowe badania prowadziły do wniosku, że rzeczywista gęstość ρ zawiera się pomiędzy 10^{-33} g/cm³ a 10^{-28} g/cm³, czyli nie dają odpowiedzi na pytanie, czy nasz Wszechświat jest zamknięty, płaski czy otwarty. Ale metody obserwacyjne ciągle się rozwijają i szansę na znalezienie odpowiedzi na to pytanie rosną. Wykorzystując teleskopy orbitalne i instrumenty nowej generacji, obserwujemy coraz bardziej odległe obiekty, a więc oglądamy coraz odleglejszą przeszłość Wszechświata. Innymi słowy, chociaż w pobliżu „początku” wszystkie trzy wykresy z rysunku 1 bardzo mało różnią się od siebie, coraz bardziej realne staje się wyróżnienie jednego z nich jako tego, który poprawnie opisuje naszą przeszłość. Badania prowadzone w tym kierunku, mimo że jeszcze nie prowadzą do ostatecznych wniosków, przechylają szansę na korzyść modelu otwartego.

Obserwatorzy starają się nie mleć własnych preferencji, lecz po prostu pilnie słuchać, co Wszechświat - za pośrednictwem wyników obserwacji - ma im do powiedzenia. Taka jest przynajmniej ich oficjalna strategia, gdyż w istocie nie sposób nie mieć własnych sympatii i upodobań. W przypadku obserwatorów ukrywają się one zwykle w milczących założeniach, które trzeba poczynić, zanim przystąpi się do jakichkolwiek pomiarów, w konstrukcji aparatów, w interpretacji wyników, w nieświadomym pomijaniu pewnych czynników, a

przyjmowaniu innych (tzw. efekty selekcji).

Obserwatorzy są świadomi możliwości występowania tych wszystkich subiektywnych elementów (a także innych, nie dających się przewidzieć czynników) i starają się je zminimalizować, na przykład przez wielokrotne powtarzanie tych samych pomiarów różnymi metodami i przy różnych założeniach. Specjaliści dopiero wtedy uznają wyniki obserwacji, dotyczące jakichś ważnych problemów, za wiarygodne, jeżeli zostaną one potwierdzone przez kilka, pracujących niezależnie od siebie, ośrodków. I dlatego pytanie, czy Wszechświat, w którym żyjemy, jest zamknięty, płaski, czy otwarty, pozostaje ciągle nierozstrzygnięte.

Zupełnie inaczej zachowują się teoretycy. Oczywiście, gdy wyniki obserwacji zostają ostatecznie ustalone, akceptują je bez dyskusji, gdyż to właśnie zgodność lub niezgodność z doświadczeniem decyduje o słuszności lub niesłuszności teoretycznych koncepcji. Ale zanim werdykt doświadczenia zostanie ogłoszony, teoretycy na ogół nie kryją swoich preferencji i uprzedzeń. Laureat Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki, Steven Weinberg, powiedział kiedyś, że „problem nie polega na tym, by nie mieć uprzedzeń, lecz na tym, by mieć uprzedzenia właściwe”. A o to, co jest właściwym uprzedzeniem, a co nie, teoretycy potrafią wieść niekończące się dyskusje. Najlepsi często mają rację (albo odwrotnie: ci, co często mają rację, należą do najlepszych).

Niekiedy teoretycy postępują jeszcze inaczej: preferują jakiś model, nie dlatego, że jest zgodny z obserwacjami, lecz z tego powodu, iż bardziej niż inne modele nadaje się do manipulacji, na przykład do wzbogacania go, by znaleźć jakąś lepszą lub ogólniejszą teorię. W ten właśnie sposób kosmologowie teoretycy często traktują model zamknięty. Nie idzie nawet o to, że w Jego ramach łatwiej prowadzi się obliczenia (w istocie najmniej kłopotów rachunkowych sprawia model płaski, bo zerują się w nim wszystkie wyrazy, w których występuje krzywizna), lecz o to, że Jest on prostszy koncepcyjnie. W modelach płaskim i otwartym trudność sprawia fakt, że przestrzeń w nich „rozciąga się w nieskończoność”. W wielu zagadnieniach wymaga to przyjęcia dodatkowych założeń, które mówią, Jak rozważana wielkość zachowuje się w przestrzennej nieskończoności. Założenia te nazywają się warunkami brzegowymi. W kosmologii mają one często postać dodatkowych równań, które niekiedy trudno „zgrać” z oryginalnymi równaniami, opisującymi ewolucję modelu. W modelu zamkniętym nie ma kłopotów z warunkami w nieskończoności, ponieważ w modelu tym przestrzeń nie rozciąga się do nieskończoności, nieskończoność przestrzenna w ogóle się nie pojawia. Niekiedy też mówi się, że w modelu zamkniętym nie ma kłopotów z warunkami brzegowymi, bo nie ma w nim „brzegów”: podróżując ciągle przed siebie, wrócimy do punktu wyjścia, ale nigdzie po drodze nie natrafimy na żaden brzeg.

Na trudność tę natknął się już Einstein w swojej pierwszej pracy kosmologicznej z 1917 roku. By uniknąć problemów, z warunkami brzegowymi, do swoich rozważań wybrał model, zamknięty (ale ze stałą kosmologiczną różną od zera). Co więcej, jego następcy tak zasugerowali się metodą Einsteina, że aż do drugiej wojny światowej niemal wszystkie badania w kosmologii relatywistycznej koncentrowały się na modelach zamkniętych. W dalszych rozdziałach zobaczymy, że nie inaczej postępują (i niemal dokładnie z tych samych względów) dzisiejsi teoretycy, chcąc skonstruować kosmologię kwantową.

Wszystko wskazuje na to, że wszechświat zamknięty łatwiej skwantować niż wszechświat otwarty. Tylko... czy przyroda zawsze wybiera łatwiejsze rozwiązania?

ROZDZIAŁ 4

KWANTOWANIE KANONICZNE

Program kanonicznego kwantowania

W poprzednich rozdziałach przygotowaliśmy grunt do podjęcia właściwego zagadnienia - kwantowania grawitacji. Pokazaliśmy, na czym problem polega; zwróciliśmy uwagę na jego nieuniknioną; scharakteryzowaliśmy obie teorie (ogólną teorię względności i mechanikę kwantową), które powinny stać się szczególnymi przypadkami Jednej, zunifikowanej teorii kwantowego pola grawitacyjnego; przygotowaliśmy wreszcie zasób modeli wszechświata, które stanowią kosmologiczną arenę, na Jakiej zagadnienie kwantowania grawitacji trzeba sformułować, ale które również są swoistym terenem doświadczalnym do wypróbowywania rozmaitych technik. Pora, by zabrać się za właściwe zadanie - za kwantowanie pola grawitacyjnego. Pierwsza strategia, jaka się narzuca, polega na zastosowaniu do grawitacji tej metody kwantowania, która sprawdziła się w zwykłej mechanice kwantowej, przystosowując ją oczywiście - jeżeli okaże się to niezbędne - do specyfiki pola grawitacyjnego. Metodą taką jest kwantowanie kanoniczne. Nazwa ta odzwierciedla fakt, iż właśnie tę metodę fizycy uznali za swojego rodzaju kanon, czyli wzór postępowania.

Myśl, by metodę kwantowania kanonicznego zastosować do pola grawitacyjnego, została rzeczywiście wysunięta jako jedna z pierwszych w tej dziedzinie badań; doprowadziła ona do długiego ciągu prac, układających się w program kanonicznego kwantowania pola grawitacyjnego. Rozdział niniejszy jest poświęcony omówieniu tego programu.

Przestrzeń stanów i kwantowanie Trzeba, oczywiście, zacząć od tego, w jaki sposób program kanonicznego kwantowania funkcjonuje w zwykłej mechanice kwantowej. Ta piękna teoria fizyczna również powstawała dzięki strategii „niezbędnych przystosowań” metod wykorzystywanych standardowo w mechanice klasycznej. W mechanice klasycznej

zachowanie układu fizycznego (dla uproszczenia niech nim będzie jeden punkt materialny) można całkowicie opisać za pomocą jego trajektorii w przestrzeni fazowej. Brzmi to dosyć groźnie, ale za chwilę zobaczymy, że za techniczną terminologią kryją się proste rzeczy.

Stan punktu materialnego w mechanice klasycznej określają dwie wielkości: położenie tego punktu w przestrzeni i jego pęd (pęd = masa \times prędkość). Jeżeli znamy położenie i pęd punktu, powiadamy, że znamy jego stan. Wyobraźmy sobie teraz pewną abstrakcyjną przestrzeń, której punktami są wszystkie możliwe stany materialnego punktu. Przestrzeń tę nazywamy przestrzenią stanów lub przestrzenią fazową.

W rozdziale 2 spotkaliśmy się już z pojęciem przestrzeni stanów (przestrzeni fazowej). Jak pamiętamy, dla mechaniki kwantowej była nią przestrzeń Hilberta.

Przestrzeni stanów nie należy mylić ze zwykłą przestrzenią (w której punkt materialny się znajduje). Zwykła przestrzeń to zbiór wszystkich możliwych położań punktu, natomiast przestrzeń fazowa - w mechanice klasycznej - jest zbiorem wszystkich możliwych stanów punktu, czyli wszystkich możliwych położań i pędów punktu materialnego.

Ewolucja układu fizycznego (w naszym przypadku: punktu materialnego) to nic innego, jak tylko przechodzenie tego układu przez kolejne (następujące po sobie) stany, czyli krzywa (albo inaczej: trajektoria) w przestrzeni fazowej. Właśnie to mamy na myśli, gdy mówimy, że znajomość zachowania się układu fizycznego sprowadza się do znajomości jego trajektorii w przestrzeni fazowej.

Tak jest w mechanice klasycznej. W mechanice kwantowej sprawa przedstawia się zupełnie inaczej. Przede wszystkim, zgodnie z relacjami nieoznaczoności Heisenberga, nie możemy znać równocześnie z dowolną dokładnością położenia i pędu cząstki kwantowej. Długi ciąg prac teoretycznych i doświadczalnych doprowadził do wniosku, że stan układu kwantowego należy określić w inny sposób. Jak przekonaliśmy się w rozdziale 2, stan układu kwantowego jest opisywany przez wektor w przestrzeni Hilberta. Wektor ten zawiera w sobie całą informację fizyczną, jaką można uzyskać o danym układzie kwantowym (na przykład o elektronie). Ale informację tę należy z wektora stanu wydobyć; nie tkwi ona „na wierzchu”, jak ma to miejsce w przypadku stanów układów makroskopowych.

I tak właśnie powinno być: stan układu makroskopowego jest bezpośrednio dostępny naszym zmysłom. Po prostu widzimy, że cząstka (punkt materialny) znajduje się tu oraz że ma taką prędkość (choć gdy chcemy ten stan określić dokładnie, musimy wykonać odpowiednie pomiary) I wystarczy te wielkości opisać za pomocą odpowiednich funkcji matematycznych; tymczasem stan układu kwantowego Jest głęboko ukryty dla naszych zmysłów. Chcąc dowiedzieć się czegoś o nim, musimy przeprowadzić skomplikowane

pomiary (które zawsze dokonują się w świecie makroskopowym, bo przecież każdy aparat pomiarowy jest „ciałem” makroskopowym) i odpowiednio je zinterpretować (wykorzystując teorię).

Na czym polega (z teoretycznego punktu widzenia) pomiar „nad układem kwantowym” (takiego zwrotu często używają fizycy)? Jak wiemy z rozdziału 2, znaczy to zadziałać operatorem, przedstawiającym pewną obserwabłą (wielkość obserwowalną), na wektor stanu, w jakim układ się znajduje. Działanie to odpowiada wejściu w kontakt aparatu pomiarowego z mierzonym obiektem. W wyniku tego stan obiektu mierzonego ulega zaburzeniu, czyli obiekt przechodzi do innego stanu, a na liczniku aparatu pomiarowego pojawia się liczba będąca wynikiem pomiaru. Teoretycznie: operator, działając na wektor stanu, przeprowadza go w inny wektor stanu. Zabieg ten daje liczbę (zwaną **wartością własną** operatora), która jest wynikiem pomiaru.

Czy zatem w odniesieniu do obiektu kwantowego w ogóle nie można mówić o położeniu i pędzie? Jest to pytanie sformułowane w sposób mglisty (co to znaczy „można mówić”?). Trzeba je więc postawić poprawnie, tzn. tak, by całkowicie mieściło się w dotychczas ustalonych pojęciowych ramach mechaniki kwantowej. Czy zatem można mierzyć położenie i pęd obiektów kwantowych? Lub jeszcze precyzyjniej: czy można zdefiniować takie operatory (obserwabły), które odpowiadałyby (w sensie ustalonym powyżej) pomiarom położenia i pędu obiektów kwantowych (na przykład elektronów)? Odpowiedź na to pytanie jest pozytywna. Uzyskano ją zbiorowym wysiłkiem wielu uczonych. W myśl zasady, że starając się przeniknąć świat kwantów, należy w minimalnym stopniu (tylko o tyle, o ile to konieczne) modyfikować prawa klasycznej fizyki, starano się do ruchu cząstek subatomowych stosować prawa fizyki klasycznej. Jak wiadomo, występują w nich pędy i położenia punktów materialnych. Okazało się, że jeżeli w tych prawach dokonamy pozornie niewielkiej (ale koniecznej!) zmiany, będą one poprawnie stosować się do świata kwantowego. Zmiana ta polega na zastąpieniu w równaniach klasycznych wyrażeń reprezentujących położenie i pęd przez odpowiednie operatory działające na przestrzeń Hilberta.

Jak wiadomo, położenie w fizyce klasycznej przedstawia się za pomocą współrzędnych. Na przykład położenie punktu w przestrzeni jednowymiarowej (na prostej) określa się przez podanie jednej współrzędnej tego punktu (tzn. odległości od wybranego punktu odniesienia). Działanie operatora położenia na wektor przestrzeni Hilberta definiuje się bardzo prosto, a mianowicie przez pomnożenie danego wektora (przedstawiającego stan badanego obiektu) przez odpowiednią współrzędną. Działanie operatora pędu na wektor

przestrzeni Hilberta jest nieco bardziej skomplikowane i wiąże się z operacją różniczkowania wektora.

Krzywe redukuje się do 3 wymiarów (bo jest to przecież nic innego, jak tylko przestrzeń w danej chwili) i dlatego nazywa się je również 3-geometrią. Każda taka 3-geometria, a więc punkt w przestrzeni wszystkich możliwych stanów Wszechświata, jest przestrzenią, w której obowiązuje geometria Riemanna (dla modelu Friedmana może to być przestrzeń płaska, z krzywizną dodatnią lub ujemną). Wynika stąd, że przestrzeń, jaką konstruujemy, jest z matematycznego punktu widzenia bardzo skomplikowana. Nic dziwnego, że nazwano ją superprzestrzenią. Istotnie, jest ona tak skomplikowana, że w praktyce trudno nią manipulować. Ażeby sytuację uprościć, Wheeler zaproponował, by ograniczyć się tylko do światów zamkniętych. Wówczas, jak wiemy, odpada problem z warunkami brzegowymi w nieskończoności i przynajmniej teoretycznie można się z trudnościami uporać.

Teoretycy posłuchali Wheelera i w swoich badaniach, niezależnie od prac obserwatorów, przez długi czas zajmowali się prawie wyłącznie światami zamkniętymi. Pójdziemy ich śladem.

Wheeler z naciskiem podkreślał, że teraz ogólna teoria względności stała się teorią dynamiczną. Należy zapomnieć o 4-wymiarowej, statycznej czasoprzestrzeni; dynamiczną wielkością w teorii względności staje się płynąca w czasie 3-geometria. W związku z tym mówi się niekiedy o (3+1)-ujęciu teorii względności (3 - to wymiar przestrzeni, a 1 - wymiar czasu).

Ale i tu powstają pewne problemy natury matematycznej. Jak wiadomo, w teorii względności na ogół nie ma jednego czasu (czas płynie różnie w różnych układach odniesienia). Co więcej, geometryczny opis przestrzeni także zależy od wyboru układu współrzędnych. Skąd więc wziąć czas, w którym ma „płynąć” 3-geometria? I jak uniezależnić się od wyboru układu współrzędnych? Na szczęście problem ten daje się rozwiązać przez odpowiednie utożsamienie niektórych stanów Wszechświata. Powoduje to dodatkowe trudności obliczeniowe, ale z teoretycznego punktu widzenia sprawa jest przejrzysta. Narzuca się myśl, by 3-geometrię uznać za odpowiednik położenia w przestrzeni stanów, czyli w superprzestrzeni. A co odpowiadałoby pędowi? Jeżeli 3-geometria płynie w czasie (czyli zakreśla krzywą w superprzestrzeni), to okazuje się, że jest sens mówić o tempie tego płynięcia, i to właśnie należy uznać za odpowiednik pędu w (3+1)-ujęciu teorii względności.

W tym miejscu konieczny jest bodaj krótki komentarz. Czy jest sens mówić o tempie płynięcia czegokolwiek w czasie? Z subiektywnego doświadczenia wiemy, że niekiedy czas

plynie wolniej, niekiedy zaś szybciej. Czy Jednak tę prędkość pływnięcia można sensownie, z fizycznego punktu widzenia, mierzyć? Wheeler zwracał też uwagę, że w jego ujęciu czas przestaje być zewnętrznym parametrem, który nie ma żadnego wpływu na przebieg zjawisk, lecz należy go rozumieć jako „sposób włożenia 3-geometria do całej superprzestrzeni”. Ów „sposób włożenia” mierzy się pewną geometryczną wielkością, która zależy od 3-geometrii. Można więc sensownie mówić o mierze zmienności tej wielkości. Jeżeli tę wielkość utożsamiamy z czasem, to czas nie jest już danym a priori parametrem, lecz pozostaje ściśle związany z 3-geometrią, czyli z określonym stanem Wszechświata. I można wówczas określać tempo zmienności tego stanu.

Wheeler nazwał to ujęcie geometrodynamiką i popularyzował w wielu pracach, z których najczęściej są cytowane: książka Geometrodynamics (Nowy Jork 1962) i artykuł Geometrodynamics and the Issue of the Final State. Ale na sugestiach i wstępnych sformułowaniach nie można poprzestać. Matematyczne szczegóły geometrodynamiki Wheelera opracowali: R. Amowitt, S. Deser i C. W. Misner. Ich wyniki są tak ważne, że dzisiaj częściej niż o geometrodynamice mówi się o ujęciu lub metodzie ADM (od pierwszych liter nazwisk autorów). Należy także wspomnieć o bardzo eleganckiej pracy A. E. Fishera, w której poddał on gruntownej matematycznej analizie własności superprzestrzeni. Okazało się, że jest ona niezwykle bogatym i geometrycznie bardzo interesującym obiektem badań.

Jeżeli nie zawężać się do jakiejś szczególnej klasy modeli kosmologicznych, lecz rozważać superprzestrzeń w całej jej ogólności, to ciągle jeszcze o niej niewiele wiemy.

Dzięki pomysłowi Wheelera i osiągnięciom jego współpracowników (metoda ADM) dysponujemy już takim ujęciem ogólnej teorii względności, które pozostaje w ścisłej analogii z mechaniką klasyczną: przestrzeni fazowej odpowiada superprzestrzeń, położeniu - stan Wszechświata w danej chwili, czyli 3-geometria, a pędowi tempo zmiany tej 3-geometrii. Zwróćmy uwagę: jest to tylko inne ujęcie ciągle tej samej ogólnej teorii względności, nigdzie jeszcze nie pojawia się kwantowanie. Rzecz jednak w tym, że dysponując ujęciem ADM tej teorii, które upodabnia ją do mechaniki klasycznej, możemy spróbować postąpić tak, jak postępuje się, przechodząc od mechaniki klasycznej do mechaniki kwantowej, czyli zastosować metodę kwantowania kanonicznego. To następny krok, który trzeba wykonać.

Kwantowy świat Wheelera-DeWitta Krok ten był w dużej mierze dziełem Bryce'a S. DeWitta. Jego fundamentalny artykuł Quantum Theory of Gravity stał się punktem wyjścia dla całego ciągu prac, które kontynuowane są do dziś. We wstępie do tego artykułu DeWitt powołuje się na pracę Wheelera i wyznaje, że „niniejszy artykuł jest bezpośrednim wynikiem

dyskusji prowadzonych z Wheelerem”. W trakcie tych dyskusji nieustannie powracało pytanie: co jest przestrzenią stanów dla kwantowej grawitacji? Konieczny jest tu precyzyjny komentarz. Wydaje się bowiem, że przenieść metodę kwantowania ze zwykłej mechaniki kwantowej na teorię grawitacji jest (przynajmniej pojęciowo) dosyć łatwo. Dysponując ujęciem ogólnej teorii względności w postaci ADM, wystarczy tylko zamienić wielkości opisujące położenie (punkt w superprzestrzeni) i pęd (tempo zmian tego punktu wzdłuż krzywej w superprzestrzeni) na odpowiednie operatory i w zasadzie sprawa będzie skończona. Tak, ale operatory muszą działać w odpowiedniej przestrzeni funkcyjnej (winna to być przestrzeń Hilberta). Co ma być tą przestrzenią? Właśnie wobec tego problemu stanął DeWitt. Zaproponował on, by na superprzestrzeni (również i on ograniczał się do superprzestrzeni określonej tylko dla światów zamkniętych) zdefiniować funkcje falowe i zbiór wszystkich takich funkcji uznać za odpowiednik przestrzeni Hilberta w zwykłej mechanice kwantowej. Wartość funkcji falowej w danym punkcie superprzestrzeni, czyli w danym stanie Wszechświata, jest związana z prawdopodobieństwem urzeczywistnienia się właśnie tego stanu. Tego rodzaju funkcje falowe nazwano wkrótce funkcjami falowymi Wszechświata. Rozgorzała potem dyskusja, jak te funkcje należy interpretować - będziemy mieli jeszcze okazję wielokrotnie powracać do tego zagadnienia.

Dysponując już odpowiednikiem przestrzeni Hilberta, można dokonać kanonicznego skwantowania ogólnej teorii względności, zamieniając wielkości opisujące położenie i pęd (w ujęciu ADM) na odpowiednie operatory. Jednakże technicznie sprawa wcale nie jest prosta. Pokonanie technicznych problemów zajęło lwią część artykułu DeWitta i wielu innych prac.

Nie na tym jednak koniec. Żeby teoria była pełna, należy jeszcze określić dynamikę (a więc ewolucję w czasie) kwantowo-grawitacyjnego układu, w naszym przypadku - kwantowego wszechświata. Formalizm funkcji falowych na superprzestrzeni niejako sam podpowiedział kształt tego równania. Wkrótce stało się ono znane jako równanie Wheelera-DeWitta (jedynie DeWitt nazywa je równaniem Wheelera). I tu zaczęły się problemy z interpretacją.

Ku zaskoczeniu wszystkich okazało się, że funkcje falowe Wszechświata w tym równaniu nie zależą od czasu. Równanie, które miało opisywać ewolucję kwantowego wszechświata, jest nieczułe na czas! Czyżby świat kwantowy był statyczny albo może istniał „cały naraz”, bez następstwa czasowego? Późniejsze dyskusje nieco wyklarowały sytuację, ale problem czasu jest nadal delikatnym zagadnieniem we wszystkich próbach tworzenia kwantowej teorii grawitacji. Będziemy do niego często powracać w następnych rozdziałach.

I tym razem równanie okazało się mądrzejsze od tych, którzy je napisali. Teoretycy

koniecznie chcieli uzyskać ewolucję Wszechświata, ale równanie postawiło weto. I miało rację.

W kwantowo-grawitacyjnym reżimie czas nie może być zewnętrznym parametrem, który tylko numeruje następujące po sobie stany. Czas staje się elementem kwantowej gry! Funkcja falowa Wszechświata zawiera w sobie informacje o prawdopodobieństwach korelacji pomiędzy zjawiskami, które mogą odgrywać rolę zegarów (na przykład emisji kwantów energii), a innymi zdarzeniami. Czas jest więc zakodowany w prawdopodobieństwach zachodzenia tych korelacji. Należy to podkreślić z naciskiem: w kwantowym reżimie czas ma charakter probabilistyczny. Stany Wszechświata nie następują po sobie w sposób konieczny; istnieje jedynie określone prawdopodobieństwo układania się poszczególnych stanów w następujące po sobie ciągi. I dopiero przy przejściu przez próg Plancka prawdopodobieństwa dążą do jedności i wyłania się deterministyczna ewolucja z czasem jako zewnętrznym parametrem.

Trudności i perspektywy Czy więc mamy już kanoniczną teorię kwantowej grawitacji? Panuje powszechna zgoda co do tego, że za wcześnie jeszcze na taki optymizm. Można co najwyżej mówić o schemacie lub metodzie kanonicznego kwantowania grawitacji. Przede wszystkim schemat ten nie może się poszczycić żadnymi konkretnymi przewidywaniami empirycznymi, które dałoby się porównać z wynikami jakichś obserwacji lub eksperymentów. Pozostało także wiele niejasnych lub nierozwiązanych problemów. Do końca nie wiadomo, czy kanoniczne kwantowanie grawitacji usuwa ostatecznie początkową (i końcową) osobliwość z historii Wszechświata. Zależy to od wielu konkretnych założeń i wprowadzanych modyfikacji. I pozostaje jeszcze problem ogólności: czy każdą czasoprzestrzeń, występującą w ogólnej teorii względności, można przedstawić w (3+D)-ujęciu? Lokalnie (tzn. w lokalnym układzie współrzędnych) zawsze da się rozłożyć czasoprzestrzeń na przestrzeń i czas, ale czy zawsze można to zrobić globalnie? Trudno na to pytanie odpowiedzieć twierdząco, gdy rozważa się czasoprzestrzeń, w której pojawiają się pętle czasowe (a sytuacje takie są dopuszczalne w ogólnej teorii względności). Pytań i trudności jest dużo i to one sprawiają, że teoretycy ciągle poszukują innych metod kwantowania pola grawitacyjnego.

Ale po stronie zwolenników kanonicznego kwantowania grawitacji trzeba też odnotować wiele sukcesów. Przede wszystkim ich prace rozrosły się w wielki program badawczy, któremu fizyka, a także matematyka, zawdzięczają wypracowanie wielu skutecznych metod, stosowanych potem także w innych dziedzinach. Nawet jeżeli metoda kanoniczna nie stworzyła ostatecznej teorii kwantowej grawitacji, to znacznie przyczyniła się

(i nadal to robi) do głębszego zrozumienia ogólnej teorii względności i jej dynamiki. W każdym nowoczesnym podręczniku teorii względności znajduje się dziś rozdział poświęcony jej kanonicznemu ujęciu.

Co więcej, metoda kanonicznego kwantowania jest niejako punktem odniesienia dla wielu innych metod. Autorzy nowych rozwiązań chętnie do niej nawiązują i porównują z nią swoje propozycje. Pod tym względem nazwa „metoda kanoniczna” wydaje się w pełni uzasadniona.

ROZDZIAŁ 5 KU JEDNOŚCI

Jedność w wielości

Przyglądając się temu, co robią fizycy rozsiani po całym świecie w rozmaitych instytucjach badawczych, można by nabrać przekonania, że współczesna fizyka jest mozaiką różnorodnych zagadnień bardzo luźno powiązanych ze sobą, być może tylko jakimś zamiłowaniem do ścisłości i mierzenia. Jedni badają przejścia dwukwantowe w atomie cezu, inni zajmują się wyznaczaniem któregoś z kolei miejsca po przecinku stałej dielektrycznej pewnej substancji, jeszcze inni poszukują atraktora w układzie nieliniowym, opisującym dynamikę przepływu cieczy. Są oczywiście i tacy, którzy poświęcają czas i siły na znalezienie kwantowej teorii grawitacji. Fizyka współczesna „rozpada się” na wiele specjalności, i to często tak odległych od siebie, że nawet koledzy z sąsiedniego laboratorium są w stanie jedynie mgliście rozumieć, co i jak bada się u kolegów za ścianą. Gdybyśmy jednak poprzestali na tym wrażeniu „niespójnej różnaitości”, popełnilibyśmy błąd „zewnętrznego obserwatora”, który jedynie ślizga się po powierzchni. Od początku istnienia nowożytna fizyka, w swojej głębszej warstwie, wykazuje zadziwiające dążenie do jedności. Ośmieliłbym się twierdzić, że czegoś podobnego (w aż takim stopniu) nie spotyka się nigdzie poza fizyką. Nie licząc może matematyki, której zresztą fizyka zawdzięcza wiele sukcesów na swojej drodze ku jedności.

Nowożytna fizyka rozpoczęła się z chwilą, gdy Kepler, Galileusz i Newton zrozumieli, że te same prawa każą planetom krążyć po ich orbitach i jabłku spadać na Ziemię. Unifikacja fizyki Ziemi i fizyki nieba była pierwszym milowym krokiem nowożytnej fizyki ku jedności. I tak już pozostało: kolejne kroki w tym samym kierunku są niejako od początku wpisane w program fizyki. Każda wielka fizyczna teoria coś łączy, na przykład teoria Maxwella - elektryczność i magnetyzm, ogólna teoria względności - szczególną teorię względności z grawitacją. Gdybyśmy teraz wyrazili przekonanie, że poszukiwana przez nas kwantowa teoria grawitacji połączy kiedyś grawitację z mechaniką kwantową, mielibyśmy oczywiście rację, ale... powiedzielibyśmy za mało. Stworzenie kwantowej teorii grawitacji nie będzie jeszcze jednym krokiem na drodze ku jedności, będzie - jak sądzimy - czymś znacznie więcej. Rzecz w tym, że poszczególne kroki także trzeba jakoś zunifikować. Postaramy się to wyjaśnić w niniejszym rozdziale.

Unifikacja oddziaływań

Świat, w którym żyjemy, jest wypadkową rozmaitych sił. Niekiedy żywimy w stosunku do nich niemal mistyczny lęk i utożsamiamy je z jakimś wewnętrznym działaniem

przyrody. Zapytani o bardziej racjonalne wyjaśnienia, najłatwiej potrafimy zidentyfikować siłę grawitacji. To ona każe spadać jabłkom na ziemię i utrzymuje nas na powierzchni naszej planety. Wiemy dziś również ponad wszelką wątpliwość, że to właśnie grawitacja każe planetom krążyć dookoła Słońca, nadaje kształty galaktykom i ich gromadom, a nawet rządzi dynamiką całego Wszechświata. Z życia codziennego znamy także siły elektromagnetyczne. Dziś trudno by nam było funkcjonować bez elektryczności i związanych z nią ułatwiających życie urządzeń, a dzięki Maxwellowi wiemy, że z każdym zmiennym polem elektrycznym wiąże się zmienne pole magnetyczne. Od czasów wybuchów bomb atomowych w Hirosimie i Nagasaki każdy słyszał coś o sitach jądrowych. Bardziej „wtajemniczeni” spośród nas wiedzą także, że są dwa rodzaje sił jądrowych: jądrowe silne (zwane również hadronowymi) i jądrowe słabe (nazywane także leptonowymi). Pierwsze utrzymują razem cząstki tworzące jądra atomów (tzw. hadrony, głównie protony i neutrony); drugim podlegają leptony (na przykład elektrony).

Współczesna fizyka uczy, że wszystkie siły przyrody można sprowadzić do czterech: grawitacyjnych, elektromagnetycznych, jądrowych silnych i jądrowych słabych. Ale dlaczego akurat do czterech, a nie na przykład do trzech lub siedmiu? Odwieczne dążenie fizyki do jedności nakazywałoby oczekiwać jednej siły podstawowej. Nic więc dziwnego, że fizycy od dość dawna w teoriach opisujących cztery podstawowe siły poszukują wspólnych mianowników, które pozwoliłyby stworzyć jedną teorię „naprawdę podstawowej siły”. Wielkim propagatorem tej idei był Albert Einstein, który całe swoje późniejsze życie (po stworzeniu ogólnej teorii względności) poświęcił poszukiwaniom „jednolitej teorii”. Dziś wiemy, że pomimo swojego geniuszu nie mógł odnieść kolejnego sukcesu. Za czasów Einsteina znane były tylko siły elektromagnetyczne i grawitacyjne, a bez włączenia do schematu unifikacji sił jądrowych (silnych i słabych) nie można zjednoczyć całej fizyki. Co więcej, okazało się potem, że najłatwiej zespolic z sobą oddziaływania elektromagnetyczne i jądrowe słabe, a bez dokonania tego połączenia nie może być mowy o unifikacji pozostałych oddziaływań.

Kluczowym punktem jest kwestia energii.

Z prac Stevena Weinberga i Abdusa Salama, opublikowanych w końcu lat sześćdziesiątych XX wieku, wyłoniła się współczesna teoria unifikująca oddziaływania elektromagnetyczne i jądrowe słabe.

Zgodnie z tą teorią dla energii poniżej 100 GeV (gigaelektronowoltów) oddziaływania elektromagnetyczne i słabe jądrowe występują jako oddziaływania różne, niesprowadzalne do siebie.

Łączą się one w jedno oddziaływanie, zwane dziś elektroslabym, gdy energie osiągają 100 GeV. Na początku lat osiemdziesiątych w wielkim europejskim akceleratorze, znajdującym się w CERN-ie pod Genewą, udało się osiągnąć energię tego rzędu wielkości i teoria unifikacyjna Weinberga-Salama została potwierdzona eksperymentalnie. By docenić wielkość tego osiągnięcia, warto uświadomić sobie, że energie sięgające 100 GeV panowały we Wszechświecie 10^{-12} sekundy po Wielkim Wybuchu. A więc w CERN-ie udało się odtworzyć (w bardzo małej objętości) warunki, jakie panowały drobnym ułamkiem sekundy po Wielkim Wybuchu, i stwierdzić, że oddziaływania elektromagnetyczne i słabe jądrowe były wówczas zunifikowane. Nic więc dziwnego, że twórcy tego sukcesu - zarówno Weinberg i Salam, jak i Carlo Rubbia, który przewodził grupie pracującej w CERN-ie - zostali uhonorowani Nagrodą Nobla.

Weinberg i Salam wskazali drogę, którą natychmiast poszli inni fizycy teoretycy, ale bardzo szybko się okazało, że nie będzie łatwej powtórki poprzedniego sukcesu. Teoretyczny schemat wprowadzony przez Weinberga i Salama (fizycy nazywają go metodą cechowania) przewiduje, że oddziaływania silne jądrowe mogą połączyć się z elektroslabymi dopiero przy energiach rzędu 10^{15} GeV. Energie takie panowały we Wszechświecie 10^{-35} sekundy po Wielkim Wybuchu i nie ma najmniejszych szans na uzyskanie ich w żadnym ziemskim akceleratorze (w przewidywalnej przyszłości). Jedyna nadzieja na eksperymentalne potwierdzenie leży w kosmologii. Jeżeli rozpad oddziaływań na silne jądrowe i elektroslabe, który dokonał się w bardzo młodym Wszechświecie, pozostawił jakieś ślady trwające do dziś, to obserwacje astronomiczne wsparte teoriami kosmologicznymi mogłyby doprowadzić do odkrycia tych śladów. Nie brak wysiłków zmierzających w tym kierunku, ale na razie Wielka Unifikacja - bo tak fizycy nazywają teorię łączącą oddziaływania jądrowe silne z elektroslabymi - pozostaje wielką hipotezą.

Istnieje kilka modeli usiłujących zrekonstruować scenariusz Wielkiej Unifikacji. Nawet gdyby któryś z nich udało się potwierdzić za pomocą obserwacji astronomicznych, to jeszcze nie wszystko. Pozostają przecież siły grawitacyjne; i je również należy włączyć w schemat unifikacyjny. Można przytoczyć kilka racji, uzasadniających stwierdzenie, że ta ostateczna unifikacja - zwana także superunifikacją fizyki - może nastąpić do **????BRAK????** język codzienny. Teraz powiem rzecz nieoczekiwaną: to, co współczesna fizyka rozumie przez wyrażenia „siła” lub „oddziaływanie”, jest najbardziej zbliżone do tego, co potocznie określa wyraz „symetria”. Ażeby jednak dostrzec związek między oddziaływaniem (siłą) a symetrią, musimy pozwolić sobie na kilka uwag wprowadzających.

Przede wszystkim, co to jest symetria? Albo bardziej konkretnie: kiedy jakąś figurę nazywamy symetryczną? Rozważmy na przykład kwadrat. Ma on pewne symetrie widoczne gołym okiem. Spróbujmy być bardziej dociekliwi: obracajmy powoli kwadrat wokół osi przechodzącej przez jego środek. Łatwo zauważyć, że jeżeli kąt obrotu wynosi wielokrotność 90 stopni (90° , $2 \times 90^\circ$, $3 \times 90^\circ$ itd.), to kwadrat pokrywa się sam z sobą.

Nic podobnego nie zachodzi, jeżeli kwadrat obrócimy o jakikolwiek inny kąt. To właśnie stanowi istotę symetrii kwadratu.

Mamy tu obrót o pewien kąt (czyli operację lub przekształcenie); podczas tego obrotu zachowuje się kształt (kwadrat pokrywa się sam ze sobą). Te dwa elementy stanowią o istocie każdej symetrii: pewna operacja (przekształcenie), podczas której coś się zmienia, a coś się zachowuje. To, co się zachowuje, nazywa się niezmiennikiem symetrii. Spójrzmy pod tym kątem na odbicie w lustrze Jakiegoś przedmiotu. Operacją jest tu odbijanie się w lustrze, niezmiennikiem zaś pewne elementy obrazu; ale nie wszystkie, bo po odbiciu lewa strona przedmiotu przechodzi w prawą stronę obrazu, a prawa strona przedmiotu - w lewą stronę obrazu. Pewne cechy przedmiotu jednak się zachowują i właśnie dlatego rozpoznajemy swoje odbicie w lustrze. Są to cechy charakterystyczne symetrii zwierciadlanej.

Dwa omówione powyżej przykłady symetrii (symetria kwadratu i symetria zwierciadlana) są przykładami symetrii przestrzennych: operacja, definiująca symetrię, sprowadza się do przekształceń w przestrzeni (obrót, odbicie zwierciadlane).

Ale pojęcie symetrii można uogólnić z figur przestrzennych na procesy; mówimy wówczas o symetriach dynamicznych. Powiadamy, że jakiś proces odznacza się symetrią, jeżeli można dokonać takiego jego przekształcenia, podczas którego pewne elementy procesu nie ulegają zmianie. Im więcej elementów zostaje zachowanych, tym bardziej proces jest symetryczny.

Przekształcenie, o jakim tu mowa, jest nieco bardziej abstrakcyjne niż w przypadku symetrii przestrzennych: przekształceniu (w sensie matematycznym) poddaje się tu równania, które dany proces opisują (musimy wszakże pamiętać, że także przekształcenia przestrzenne - na przykład obrót kwadratu - można „zadać” poprzez równania).

Teraz już jesteśmy przygotowani, by wrócić do problemu fundamentalnych oddziaływań fizycznych. Każde oddziaływanie można utożsamić z procesem, polegającym na tym, że na przykład dwie cząstki elementarne działają na siebie siłą charakterystyczną dla danego oddziaływania. Okazuje się, że każde z oddziaływań fizycznych ma typową dla siebie symetrię. Symetrie te oznacza się za pomocą specjalnych symboli.

Na przykład symetrię oddziaływania elektromagnetycznego symbolem $U(1)$, a

oddziaływania elektroslabego - przez $U(1) \times S(U2)$. Symbole te są tak dobrane, że mówią coś o równaniach, które daną symetrię opisują. Co więcej, symetrie są tak charakterystyczne dla poszczególnych oddziaływań, że fizycy bardzo często utożsamiają oddziaływania z odpowiednimi symetriami.

Gdy w ten sposób ponownie spojrzymy na fundamentalne oddziaływania fizyczne, jeszcze bardziej wyraziście ujawnia się odmiennosc oddziaływań grawitacyjnych od wszystkich pozostałych. Jak pamiętamy, grawitacja - zgodnie z ogólną teorią względności - to nic innego jak zakrzywienie czasoprzestrzeni.

Nic więc dziwnego, że symetria charakterystyczna dla grawitacji jest typu czasoprzestrzennego. Tylko tym różni się ona od symetrii przestrzennych, że odpowiednie przekształcenia nie zachodzą w przestrzeni, lecz w czasoprzestrzeni. Natomiast symetrie charakterystyczne dla wszystkich innych oddziaływań fizycznych są symetriami dynamicznymi. Różnica ta z matematycznego punktu widzenia jest tak duża, że bardzo trudno znaleźć tak bogatą symetrię, która łączyłaby w sobie czasoprzestrzenną symetrię grawitacji z dynamicznymi symetriami innych oddziaływań. A znalezienie takiej symetrii jest niezbędne, jeżeli ma się dokonać zunifikowanie całej fizyki.

Supersymetria i superunifikacja

Trudności w połączeniu symetrii czasoprzestrzennych z dynamicznymi były tak duże, że wymusiły na fizykach kolejne uogólnienie pojęcia symetrii. Nie jest to nic zaskakującego w historii fizyki. Droga ku jedności niejednokrotnie już wiodła przez kolejne uogólnianie pojęć. Tym razem Jednak wyjątkowość sytuacji polega na tym, że uogólnienie sięga bardzo daleko. Dotychczas niejako podstawowym budulcem wszystkich struktur matematycznych wykorzystywanych w fizyce teoretycznej były liczby rzeczywiste lub liczby zespolone. Podstawowym budulcem nowej symetrii, nazwanej potem supersymetrią, są zupełnie nowe liczby, zwane liczbami Grassmanna lub superliczbami. Każdą superliczbę można przedstawić w postaci szeregu liczb zespolonych i rzeczywistych, ale istotną rzeczą jest to, że niektóre superliczby przy zmianie kolejności ich mnożenia przez siebie zmieniają znak (w naukowym żargonie mówi się wówczas, że takie dwie superliczby antykomutują).

Własność ta jest niezwykle ważna z punktu widzenia interpretacji fizycznej. W znacznej mierze właśnie tej niewielkiej zmianie w porównaniu z własnościami zwykłych liczb supersymetria zawdzięcza swoją ogromną moc unifikującą. Przyjrzyjmy się nieco bliżej mechanizmowi tej unifikacji.

Supergrawitacja świat „na powierzchni”, czyli świat doznawany przez nas w codziennym doświadczeniu i badany przez fizykę klasyczną, nie jest zunifikowany. Odnacza

się on bogactwem i różnorodnością form, ogromną różnorodnością oddziaływań. Ale gdy, dzięki fundamentalnym teoriom współczesnej fizyki, wnikamy w głąb, pod powierzchnię zjawisk, ukazuje się nam rzeczywistość coraz bardziej prosta i zunifikowana. Na poziomie Wielkiej Unifikacji istnieją już tylko dwa rodzaje cząstek: fermiony i bozony. Fermiony to te cząstki, które tworzą materię otaczającego nas świata i nas samych, a bozony to cząstki, które przenoszą oddziaływania. Na przykład protony i neutrony, główne składniki jąder atomowych, są fermionami, a foton - bozonem, cząstką przenoszącą oddziaływania elektromagnetyczne. Innym przykładem bozonów są gluony, cząstki przenoszące silne oddziaływania jądrowe. Oddziaływanie takie można sobie wyobrazić jako wymianę gluonów przez dwie cząstki, które wywierają na siebie wpływ.

Z punktu widzenia teorii silnych oddziaływań jądrowych (tzw. chromodynamiki kwantowej) proton i neutron nie należą do dwu różnych rodzin cząstek elementarnych, lecz są przedstawicielami tylko jednej rodziny - hadronów (hadrony są fermionami). Ale hadron może znajdować się w dwóch stanach.

W jednym stanie jest protonem, w drugim zaś stanie - neutronem. Jednakże dla teorii silnych oddziaływań jądrowych fermiony i bozony są dwiema, niesprowadzalnymi do siebie, rodzinami cząstek elementarnych o zupełnie odmiennych własnościach symetrii. Chcąc skonstruować teorię w pełni zunifikowanych oddziaływań, należałoby znaleźć taką symetrię, która fermiony i bariony traktowałaby jako jedną rodzinę.

Okazuje się jednak, że aby to uzyskać, trzeba było uogólnić samo pojęcie symetrii. W ten właśnie sposób powstała koncepcja supersymetrii. Przewiduje ona istnienie tylko jednego rodzaju cząstek, zwanych supercząstkami. Supercząstki mogą istnieć w dwu stanach: w jednym stanie są one fermionami, w drugim - barionami (jest to możliwe dzięki temu, że pewne superliczby antykomutują).

I tu stajemy się świadkami swoistego cudu matematycznego: założmy, że poddajemy fermion przekształceniu supersymetrii, w wyniku czego otrzymujemy bozon - tak powinno być, ponieważ fermion i bozon to tylko dwa stany tej samej supercząstki. Poddajmy teraz bozon odwrotnemu przekształceniu supersymetrii. Powinniśmy z powrotem otrzymać fermion.

I otrzymujemy, ale... przesunięty w czasoprzestrzeni (w porównaniu do pierwotnego fermionu) dokładnie o tyle, o ile wymaga tego przekształcenie charakterystyczne dla teorii względności (tzw. przekształcenie Lorentza). A zatem dynamiczna symetria fermion \rightarrow bozon \rightarrow fermion łączy się z symetrią czasoprzestrzenną. Wydaje się, że jesteśmy już bliscy zunifikowania grawitacji z pozostałymi oddziaływaniami.

Istotnie, wykorzystując supersymetrię, udało się zbudować nową teorię unifikującą wszystkie oddziaływania. Nazywa się ją teorią supergrawitacji. Teoria ta odznacza się niezwykłą elegancją matematyczną i z początku wiązano z nią ogromne nadzieje, lecz miarę coraz dokładniejszego jej opracowywania zaczęły się piętrzyć nowe trudności.

Jak wiadomo, z fizycznego punktu widzenia najważniejszą rzeczą dla każdej teorii są jej empiryczne przewidywania. Teoria supergrawitacji w swojej najprostszej wersji przewiduje istnienie dwu cząstek przenoszących oddziaływania grawitacyjne: dobrze znany graviton i nowa cząstka, którą nazwano gravitino. Ta ostatnia cząstka odgrywałaby znaczącą rolę tylko w supergęstych stanach Wszechświata, w erze Plancka. W kolejnych, coraz bardziej skomplikowanych wersjach teorii supergrawitacji nowych, dotychczas nieznanymi cząstek pojawia się coraz więcej. Wiąże się z tym pewna szansa. Gdyby udało się stworzyć tak skomplikowaną wersję teorii supergrawitacji, że przewidywałaby ona istnienie kilkuset rodzajów cząstek, i gdyby każdy z tych rodzajów cząstek udało się zidentyfikować ze znanymi rodzajami cząstek (jest ich kilkaset, wliczając tzw. rezonanse), sukces byłby pełny. Niestety, wykazano jednak, że może istnieć jedynie osiem wersji teorii supergrawitacji i że wersja ósma, najbardziej „pełna”, przewiduje tylko 163 rodzaje cząstek - stanowczo za mało w porównaniu z tym, co zna współczesna fizyka wysokich energii.

Pierwotny entuzjazm osłabł. Trzeba było szukać nowych pomysłów.

Superstruny

Jak zapewnić poszukiwanej teorii więcej „stopni swobody”, czyli jak teorię zmusić do tego, by „zrobiła miejsce” dla większej liczby różnych rodzajów cząstek? W gruncie rzeczy pomysł już istniał, należało go tylko przystosować do nowych wymagań. We wszystkich dotychczasowych teoriach cząstki traktowano jako punkty obdarzone pewnymi własnościami fizycznymi, takimi jak masa czy ładunek elektryczny. Ale dlaczego punkty? Czemu nie na przykład cieniutkie nitki, struny - jak je zaczęto nazywać. Tym bardziej że struna ma naturalne własności, których nie trzeba jej sztucznie przypisywać; na przykład struna może mieć napięcie lub może oscylować. Pomysł pochodził od Yoishiro Nambu z Uniwersytetu w Chicago. Dokładniejsze obliczenia pokazały, iż teoria rzeczywiście funkcjonuje, ale pod warunkiem, że przestrzeni przypisze się 26 wymiarów! Wówczas na przykład napięcie struny odpowiada masie cząstki.

Gdy teoria supergrawitacji znalazła się w kryzysie, pomysł strun odżył. John Schwarz z Caltechu (California Institute of Technology) poprawił teorię i zredukował liczbę wymaganych wymiarów do 10. W roku 1976 Ferdinando Gliozzi z Turynu i David Olive z Imperial College w Londynie połączyli struny z supersymetrią i nową koncepcję nazwali

teorią superstrun.

Ale dopiero z chwilą, gdy John Schwarz i Michael Green wykazali, że teoria superstrun, zawierając w sobie supergrawitację, jest od niej istotnie bogatsza, rozpoczął się wielki boom na superstruny. Coraz więcej fizyków zaczęło wierzyć w to, że teoria superstrun jest od dawna poszukiwaną Teorią Wszystkiego i że pozostaje tylko kwestią czasu (oraz rozwinięcia odpowiednich metod obliczeniowych), by to udowodnić.

Wielkim entuzjastą teorii superstrun stał się Edward Witten, człowiek o nieprzeciętnych zdolnościach matematycznych.

Jemu teoria superstrun zawdzięcza wiele konkretnych osiągnięć. Między innymi zaproponował on wyjaśnienie, dlaczego z pierwotnych dziesięciu wymiarów do dziś pozostały tylko 4 (3 przestrzenne i 1 czasowy). Mechanizm Wittena nazywa się redukcją wymiarową. Zgodnie z tym mechanizmem za zredukowanie wymiarów odpowiedzialne jest rozszerzanie się Wszechświata. Na początku, w erze Plancka, gdy dynamikę kosmosu kontrolowała teoria superstrun, przestrzeń miała 10 wymiarów (niektóre wersje teorii superstrun wymagają innej liczby wymiarów). Dynamika ówczesnego Wszechświata rozdymała 4 wymiary, z których narodziła się dzisiejsza czasoprzestrzeń, ale ścisnęła pozostałe (tzn. w pozostałych wymiarach Wszechświat się kurczył). Istotą redukcji wymiarowej jest to, że w pozostałych sześciu wymiarach przestrzeń jest zwarta, tzn. „zamyka się w sobie”, jak powierzchnia zwykłej kuli. Ta sama dynamika, która sprawia, że Wszechświat rozszerza się w czterech wymiarach, powoduje coraz ciaśniejsze zwijanie się Wszechświata w sześciu zwartych wymiarach. Wkrótce po przekroczeniu progu Plancka wymiary te są tak ciasno zwinięte, że czują je tylko supercząstki, natomiast z makroskopowego punktu widzenia pozostają one niewidzialne.

Zasadnicza idea teorii superstrun polega na tym, ażeby całe bogactwo świata fizyki otrzymać z zachowania się i dynamiki strun. Struny mogą mieć różne napięcia, wykonywać rozmaite oscylacje i obroty. Są struny otwarte i zamknięte (pętle). Oddziaływania pomiędzy cząstkami odpowiadałyby łączeniu się lub przerywaniu strun. Typowe rozmiary struny wynoszą 10^{-33} cm, czyli są równe długości Plancka, a więc już nawet w skali typowej dla jądra atomowego (10^{-13} cm) struny można traktować jako punkty o nierozróżnialnej strukturze wewnętrznej.

Podobnie jak teoria supergrawitacji, także teoria superstrun przewiduje istnienie nieznanych dotychczas cząstek (jedną z nich jest cząstka, zwana aksjonem). Odkrycie któregoś z nich byłoby niewątpliwie ważnym argumentem na rzecz tej teorii.

Niestety, dotychczas nie może się ona poszczycić takim osiągnięciem.

Interesującym (i nieco bulwersującym) przewidywaniem teorii superstrun jest istnienie materii-cieni [shadow matter].

Zgodnie z tą teorią każda znana nam cząstka ma swój supersymetryczny odpowiednik. Nasz świat ze światem cieni oddziaływał jedynie poprzez grawitację, i to tylko wtedy, gdy grawitacja była odpowiednio silna, czyli w erze Plancka. Obecnie materia-cień może się znajdować nawet „w zasięgu ręki” (choćby w jądrze Ziemi - pozwalają na to niektóre modele), ale jest dla nas zupełnie niewykrywalna.

Do niedawna teoria superstrun była ostatnim krzykiem naukowej mody. Dziś jeszcze ciągle poświęca się jej wiele uwagi, ale entuzjazm znacznie osłabł. Wydaje się, że ogromny wysiłek bardzo wielu uczonych, setki opublikowanych prac i kosztowne programy badawcze wydusiły z tej teorii prawie wszystko, co się z niej dało wydusić. Niewątpliwe sukcesy są, ale do spodziewanej Teorii Wszystkiego ciągle bardzo daleko. Nie stało się tak, jak przewidywali najbardziej zagorzali zwolennicy teorii superstrun: nie zawojowała ona całkowicie terenu poszukiwań ostatecznej teorii. Stała się ważną i nadal eksploatowaną dziedziną badań, lecz nie wyeliminowała konkurencyjnych strategii. Poszukiwania trwają nadal.

ROZDZIAŁ 6

WSZECHŚWIAT HAWKINGA

Parowanie czarnych dziur

Stephen W. Hawking jest bardzo ważną postacią w kwantowej kosmologii. Jego naukowa kariera dobrze go do tego przygotowała. Od początku błyskotliwy umysł Stephena łączył głęboką znajomość metod matematycznych z pasją fizyka. Potrafił szybko opanować wyrafinowane działy nowoczesnej matematyki, ale przede wszystkim chciał wiedzieć, jaki ten świat jest naprawdę. I interesowały go zawsze problemy najważniejsze. Jego pierwsze prace badawcze dotyczyły zagadnienia osobliwości.

Metodę przejął od Rogera Penrose'a, ale szybko ją wyostrzył.

Penrose badał osobliwości w procesie kolapsu grawitacyjnego; Hawking za pomocą jego metody zaatakował problem... początku Wszechświata. Jakiś czas Hawking i Penrose pracowali razem, osiągając piękne wyniki, ale potem ich drogi się rozeszły.

Penrose poszukiwał całkiem nowych dróg. Jego zdaniem przyszła teoria kwantowej grawitacji będzie się opierać na zupełnie nowej matematyce. Hawking wierzył, że metody już znane i dobrze sprawdzone na terenie fizyki kwantów i fizyki grawitacji dadzą się tak uelastycznić i wzajemnie do siebie dostosować, iż właśnie na tej drodze da się najprędzej i najskuteczniej uzyskać interesujące wyniki. Niewykluczone, że będą to początkowo tylko robocze modele, ale jeżeli zaczną one dobrze pracować, to z pewnością wskażą kierunek dalszych, bardziej radykalnych innowacji.

Pierwszym sukcesem osiągniętym na tej drodze był słynny model parowania czarnych dziur. Klasyczna czarna dziura (czyli bez uwzględniania efektów kwantowych) powstaje wówczas, gdy proces zapadania się obiektu (na przykład masywnej gwiazdy) doprowadza do odizolowania się tego obiektu od „reszty świata” i powstania „horyzontu”, tzn. do takiej sytuacji, w której nawet promień światła wysłany na zewnątrz zostaje z powrotem zawrócony przez pole grawitacyjne kolapsującego obiektu. Dalszy los tego, co dzieje się pod horyzontem, pozostaje nieznany dla zewnętrznego obserwatora. Hawking udowodnił, że jeżeli uwzględnić efekty kwantowe, to istnieje skończone prawdopodobieństwo, iż jakaś cząstka może znaleźć się na zewnątrz horyzontu. Czarna dziura traci więc masę. Obrazowo mówi się, że czarna dziura paruje.

Model Hawkinga opierał się na metodach przybliżonych (był, jak się mówi, semikwantowy) i oczywiście nigdy dotychczas nie został sprawdzony obserwacyjnie, jednakże specjaliści uznali go za ważne osiągnięcie. Zyskał on sobie niewątpliwie trwałą pozycję w poszukiwaniach właściwej kwantowej teorii grawitacji.

Hawking nie poprzestał na parowaniu czarnych dziur. Jego ambicją było zrozumieć, jak powstał Wszechświat. W ten sposób narodziła się słynna praca Hawkinga i Jima Hartle'ego o kwantowym stwarzaniu wszechświata z niczego.

Czasoprzestrzenne tuby

Praca ta ukazała się w 1983 roku i odwagą swojego pomysłu od razu wzbudziła zainteresowanie. W obiegu już było kilka modeli tzw. kwantowego stwarzania świata z nicności, ale zamiar Hartle'ego i Hawkinga był bardziej ambitny: chodziło o trafienie jednym strzałem w dwa cele - wyjaśnienie pochodzenia Wszechświata i stworzenie ogólnej metody, łączącej w sobie istotne elementy fizyki kwantowej i ogólnej teorii względności.

W mechanice kwantowej istnieje bardzo skuteczna metoda rachunkowa, zwana metodą Feynmana całkowania po drogach. Chcąc obliczyć prawdopodobieństwo przejścia układu kwantowego ze stanu A do stanu B, należy rozpatrzyć wszystkie możliwe drogi prowadzące od A do B, wzdłuż tych wszystkich dróg obliczyć pewną całkę, zwaną całką działania, i wszystkie wyniki odpowiednio zsumować. Wynik sumowania będzie poszukiwanym prawdopodobieństwem.

Ujęcie feynmanowskie mechaniki kwantowej jest równoważne podejściu tradycyjnemu (w języku operatorów na przestrzeni Hilberta), ale skuteczniej niż ono daje się przenieść do czasoprzestrzeni szczególnej teorii względności. Stąd też jest ono szeroko stosowane w kwantowej teorii pola, która - jak wiadomo - łączy mechanikę kwantową ze szczególną teorią względności. Hartle i Hawking postanowili powtórzyć ten sukces dla ogólnej teorii względności.

Co jest stanem Wszechświata w ogólnej teorii względności? Wiemy, że jest nim 3-geometria w danej chwili czasu (por. rozdział 4). Przejść więc od jednego stanu do drugiego znaczy skonstruować taką „tubę czasoprzestrzenną”, która łączyłaby 3-geometrię w pewnej chwili z inną 3-geometrią w innej chwili czasu.

Żeby to miało sens, musimy przyjąć - i tak też zrobili Hartle i Hawking - że Wszechświat jest przestrzennie zamknięty. Pomóżmy naszej wyobraźni, redukując liczbę wymiarów do dwu (rys. 6.2). Odpowiednikiem stanu zamkniętego Wszechświata będzie okrąg. Odpowiednikiem drogi łączącej dwa takie stany - (zniekształcony) walec. Dlatego też na oznaczenie drogi w czasoprzestrzeni użyłem określenia „tuba czasoprzestrzenna”.

Zgodnie z metodą Feynmana musimy teraz rozpatrzyć wszystkie możliwe tuby łączące dwa stany Wszechświata, obliczyć wzdłuż nich odpowiednie całki i dokonać sumowania.

Hartle i Hawking zaproponowali odpowiednie wzory; ich model zaczął „pracować”,

co znaczy, że w zasadzie można było wyliczać prawdopodobieństwa przejść Wszechświata pomiędzy różnymi stanami. Piszę „w zasadzie”, ponieważ rachunki są trudne i Hartle wraz z Hawkingiem w swojej pracy przeprowadzili wszystkie obliczenia tylko dla bardzo uproszczonych modeli.

Kwantowe stworzenie Wszechświata Co to znaczy „stworzyć świat z nicości”? Na to pytanie można odpowiedzieć w następujący sposób: stworzenie jest to przejście ze stanu, którego nie ma, do Jakiegokolwiek innego stanu Wszechświata. Jeżeli prawdopodobieństwo takiego przejścia jest różne od zera, to Wszechświat może powstać z niczego na mocy praw fizyki kwantowej odpowiednio połączonych z zasadami ogólnej teorii względności.

Wiemy już, jak za pomocą metody Hartle’ego i Hawkinga obliczyć prawdopodobieństwo przejścia Wszechświata ze stanu, powiedzmy, X do stanu Y. Ale w jaki sposób pozbyć się stanu X? Od stanu X do stanu Y prowadzą czasoprzestrzenne tuby, zaczynające się w X, a kończące w Y. Gdyby udało się usunąć stan X i wszystkie tuby od tego końca, w którym powinno być X, gładko zasklepić (tak, by wszystkie od tej strony kończyły się półsferą), to stosując rachunkowy przepis Hartle’ego-Hawkinga, można by obliczyć prawdopodobieństwo przejścia Wszechświata od niczego do stanu Y, czyli prawdopodobieństwo wyłonienia się stanu Y z nicości. Mielibyśmy zatem kwantowy model stwarzania świata z nicości.

Ale czy można tak bezkarnie usunąć stan X i pozasklepić gładko wszystkie tuby od końca, w którym X powinno się znajdować? Okazuje się, że istotną przeszkodą jest czas. Mamy bowiem do czynienia z tubami czasoprzestrzennymi, a czas - mimo że geometrycznie jest traktowany jako czwarty wymiar - posiada jednak inne własności od pozostałych wymiarów przestrzennych. Matematycznie przejawia się to tym, że współrzędna czasowa ma inny znak niż współrzędne przestrzenne, na przykład gdy współrzędne przestrzenne są dodatnie, współrzędna czasowa - ujemna. To sprawia, że tuby czasoprzestrzenne nie da się zasklepić gładko: na ich końcach nie powstaje wygładzona półsfera, lecz raczej ostro zakończony stożek lub, mówiąc bardziej naukowym językiem, usunięcie stanu X powoduje pojawienie się osobliwości.

I tu znowu doszła do głosu pomysłowość Hartle’ego i Hawkinga. W kwantowej teorii pola fizycy stosują niekiedy rachunkowy trik, polegający na tym, że współrzędną czasową mnoży się przez jednostkę urojoną (czyli przez pierwiastek z minus jeden). Zabieg ten sprawia, że w wielu wzorach (w których współrzędne są podniesione do kwadratu) znika różnica znaku pomiędzy współrzędnymi przestrzennymi i współrzędną czasową. Zabieg ten nazywa się transformacją Wieka. Dzięki niemu można przeprowadzić trudne obliczenia.

Aby odczytać końcowy wynik, znowu powraca się do pierwotnej konwencji w zapisie współrzędnych. Hartle i Hawking potraktowali ten prosty trik rachunkowy całkiem serio. Założyli, że w bardzo młodym Wszechświecie transformacja Wieków ma znaczenie fizyczne: znika jakakolwiek różnica pomiędzy przestrzenią i czasem, czasoprzestrzeń staje się zwykłą czterowymiarową przestrzenią. Wówczas tuby można już zasklepić gładko. Kwantowy model stwarzania funkcjonuje poprawnie.

Jednakże - Hartle i Hawking podkreślają to z naciskiem - takie potraktowanie transformacji Wieków jest dodatkową inwestycją, założeniem nie wynikającym z żadnych fizycznych zasad, uczynionym wyłącznie po to, by model mógł funkcjonować.

A zatem w modelu Hartle'ego-Hawkinga „na początku” nie było czasu, lecz jedynie czterowymiarowa przestrzeń.

Wszechświat nie podlegał więc żadnej ewolucji, po prostu BYŁ. Ale nie był to Wszechświat wieczny, czyli istniejący od minus czasowej nieskończoności. Gdy nie ma czasu, pojęcie minus czasowej nieskończoności nie ma żadnego sensu. Mielibyśmy tu raczej do czynienia z beczasowym stwarzaniem: dla każdego stanu Wszechświata istnieje skończone prawdopodobieństwo wyłonienia się go z nicości na mocy kwantowo-grawitacyjnych praw. Czas w modelu Hartle'ego-Hawkinga pojawia się jako swoiste złamanie symetrii pomiędzy czterema współrzędnymi przestrzennymi. Gdy jedna z nich otrzymuje odmienny znak od pozostałych i staje się czasem, Wszechświat przekracza próg Plancka, rozpoczynając swoją standardową ewolucję.

Nic dziwnego, że znany bestseller Hawkinga nosi tytuł Krótka historia czasu. Początek świata jest beczasowy, ale czas ma swoją historię.

Ażeby dobrze określić model kosmologiczny, nie wystarczą tylko prawa fizyki, na podstawie których się go konstruuje.

Trzeba ponadto „zadać” warunki początkowe i brzegowe. Prawa fizyki muszą od czegoś rozpocząć swoje funkcjonowanie.

To właśnie określają warunki początkowe. Musi być również wyznaczony zakres działania praw fizyki. I to jest zadaniem warunków brzegowych (należy określić, jak prawa fizyki zachowują się na „brzegu” rozważanego układu). Zwykle w fizyce warunki początkowe i brzegowe narzuca sama struktura problemu. Jeżeli na przykład badam ruch wyrzuconego kamienia, to warunkami początkowymi są prędkość początkowa i początkowy kierunek, jakie zostały nadane kamieniowi w chwili jego wyrzucenia. Kiedy badam pole grawitacyjne Słońca, to jako warunek brzegowy mogę przyjąć fakt, że w bardzo dużych odległościach od Słońca pochodzące od niego pole grawitacyjne jest zaniedbywalnie słabe.

Ale gdy badam Wszechświat, skąd wziąć warunki początkowe i brzegowe? Jakikolwiek bym przyjął, natychmiast rodzą się pytania: skąd się wzięły? jak je uzasadnić? Warunki początkowe i brzegowe wprowadzają więc do Wszechświata element dowolności, pewnej przygodności modelu, stanowią lukę w wyjaśnieniu wszystkiego do końca.

A gdyby tak pozbyć się warunków początkowych i brzegowych? Problem zostałby rozwiązany radykalnie. Z warunkami brzegowymi sprawa jest prostsza. Zrezygnował z nich Już Einstein w swoim pierwszym modelu kosmologicznym z 1917 roku. Właśnie dlatego przyjął, że świat jest przestrzennie zamknięty, ażeby uniknąć kłopotów z warunkami brzegowymi. Jak pamiętamy, model Hartle'ego i Hawkinga jest również przestrzennie zamknięty, a więc ten problem likwiduje się automatycznie.

A co z warunkami początkowymi? Zauważmy, że model Hartle'ego-Hawkinga de facto nie ma żadnego początku. Dzięki transformacji Wieka w młodym Wszechświecie znika czas, a wraz z nim problemy początku i warunków początkowych.

Ponieważ początek jest także swojego rodzaju brzegiem (czasowym brzegiem modelu), o warunkach początkowych i brzegowych możemy mówić łącznie jako o warunkach brzegowych. Używając tej konwencji, Hartle i Hawking podkreślają, że w ich modelu nie ma żadnego brzegu. „Jedynym warunkiem brzegowym - jak mówią - jest to, że świat nie ma brzegów”. Daje to - ich zdaniem - pełne wyjaśnienie Wszechświata.

Czy rzeczywiście? Wyjaśnienie zaproponowane przez Hartle'ego i Hawkinga odwołuje się do praw fizyki. Bez przyjęcia, już w punkcie wyjścia, że obowiązują prawa fizyki (w szczególności prawa kwantów i grawitacji), nie byłoby oni w stanie uczynić żadnego kroku badawczego, nie mogłoby być mowy o żadnym modelu kwantowej kreacji. Konieczność wyjaśnienia należy więc rozciągnąć także na prawa fizyki. Ale w takim razie natychmiast rodzą się pytania: skąd się one biorą? dlaczego właśnie takie a nie inne? Dociekliwość i duch krytycyzmu nakazują nigdy nie zaprzestawać stawiania pytań, jeżeli jeszcze o coś można zapytać. Problem natury i pochodzenia praw przyrody jest jednym z najdonioślejszych problemów współczesnej filozofii fizyki.

Chociaż więc model Hartle'ego-Hawkinga nie odpowiada na wszystkie pytania (jak sugerują jego niektóre popularne opracowania), jest on wymownym dowodem na to, jak daleko może sięgnąć matematyczna metoda badania świata. Jeszcze stosunkowo niedawno nikt w fizyce (nie w filozoficznych rozważaniach wokół fizyki, lecz w samej fizyce) nie odważyłby się postawić pytania o genezę Wszechświata, a tym bardziej podjąć próby skonstruowania modelu Jego narodzin. Specjaliści (ale nie zawsze autorzy książek popularnych) doskonale zdają sobie sprawę z tego, że model Hartle'ego-Hawkinga jest

zaledwie pierwszą próbą „modelem zabawkowym” (jak powiadają); że jego prowizoryczny sukces opiera się na zbyt wielu, w gruncie rzeczy dowolnych, założeniach. Ale jest to krok w kierunku stawiania coraz ambitniejszych pytań oraz poszukiwania na nie odpowiedzi, I to za pomocą metod, jakimi zwykła posługiwać się fizyka teoretyczna.

Jest to więc krok ukazujący pewną agresywność matematyczno-empirycznej metody badania świata. I to krok zdecydowany. A zdecydowane kroki mają to do siebie, że pociągają za sobą następne. Praca Hartle’ego i Hawkinga stała się inspiracją do dalszych prac badawczych.

ROZDZIAŁ 7

WSZECHŚWIAT I INSTANTONY

Program badawczy Hawkinga

Pojawienie się zaproponowanego przez Hartle'ego i Hawkinga modelu kwantowego stwarzania Wszechświata z nicości spowodowało wiele kontrowersji. Dla jednych był to ogromny sukces, świadczący o potędze matematycznej metody badania świata; dla innych - sztuczny model, zbudowany w oparciu o założenia przyjęte od hoc, które nie wynikają z żadnej podstawowej teorii.

Ażeby model uprawomocnić w oczach naukowej opinii, należało jak najszybciej skonstruować jego ulepszone wersje i pokazać, że jeśli nawet nie są one w stanie przewidzieć jakichś nowych, dających się zaobserwować efektów, to przynajmniej mogą wytłumaczyć pewne niewyjaśnione dotychczas zagadnienia kosmologiczne. Od początku jednak było wiadomo, że wyliczenie dokładnego modelu kosmologicznego wedle recepty Hartle'ego-Hawkinga jest tak trudne, iż praktycznie niewykonalne.

Nie jest to wszakże sytuacja w fizyce wyjątkowa. W takich przypadkach stosuje się metody przybliżone. Taką też strategię przyjął Hawking i jego współpracownicy.

Pamiętamy, że w metodzie Hartle'ego-Hawkinga, chcąc wyznaczyć prawdopodobieństwo zaistnienia danego stanu Wszechświata, musimy obliczyć pewną całkę (zwaną całką działania) wzdłuż wszystkich możliwych „dróg”, kończących się na tym stanie. Tych dróg jest teoretycznie nieskończenie wiele.

Problem znacznie się upraszcza, jeśli wziąć pod uwagę tylko tych kilka dróg, wzdłuż których całka działania ma wartość największą. Oczywiście, nie zawsze musi istnieć kilka „najważniejszych” dróg. Może być tak, że całka działania ma zbliżone wartości wzdłuż bardzo wielu dróg; wówczas problemu nie da się uprościć. Jednakże te przypadki, w których da się to zrobić, są szczególnie ważne, gdyż przedstawiają one wszechświaty znacznie bardziej prawdopodobne od innych, a z oczywistych względów mamy prawo przypuszczać, że nasz Wszechświat jest bardziej prawdopodobny od tych, które nie zaistniały.

Takie uproszczone rozwiązanie, w którym przyczynek do całości pochodzi tylko od kilku dróg, nazywa się rozwiązaniem instantonowym lub krótko: instantonem. Musimy ustawicznie pamiętać, że w metodzie Hartle'ego-Hawkinga drogi są w rzeczywistości tubami czasoprzestrzennymi, które kończą się jedną trójwymiarową geometrią, przedstawiającą dany stan Wszechświata. Z najprostszym instantonem mamy do czynienia wówczas, gdy największy przyczynek pochodzi tylko od jednej drogi-tuby, kończącej się trójwymiarową, zamkniętą powierzchnią. Jeżeli liczymy prawdopodobieństwo wyłonienia się z nicości stanu

Wszechświata, reprezentowanego przez tę powierzchnię, to jedyna tuba, która do niej prowadzi, z drugiego swojego końca jest gładko zaokrąglona. Taki najprostszy instanton przypomina więc przeciętą na pół kulę (jeśli pominąć Jeden wymiar) zamkniętą powierzchnią, powstałą z przecięcia kuli (rys. 7.1). Kształty innych instantonów mogą być bardzo różnorodne.

Instanton i inflacja

Pierwszy instanton wyliczyli Hawking i Ian Moss. Przedstawiał on wyłanianie się z nicności wszechświata w stanie permanentnej inflacji z zamkniętymi przestrzeniami chwilowymi (reprezentującymi stany wszechświata). To, że przestrzenie te były zamknięte, nie stanowiło niczego szczególnego, ponieważ, jak pamiętamy, metoda Hartle'ego-Hawkinga od początku była opracowana dla zamkniętych wszechświatów. Interesującą cechą instantonu Hawkinga-Mossa było natomiast to, że prowadził on do wszechświata inflacyjnego.

Inflacyjnymi nazywa się te modele kosmologiczne, w których ekspansja, czyli rozszerzanie się Wszechświata, zachodzi bardzo szybko (wykładniczo). Modele inflacyjne były znane od dawna. W ogóle pierwszym odkrytym modelem rozszerzającego się Wszechświata był model inflacyjny - tzw. model de Sittera ale po raz pierwszy proces inflacji do wyjaśnienia pewnych zjawisk w rzeczywistym Wszechświecie zastosował Alan Guth w 1981 roku. Celem rozwiązania kilku paradoksów, z jakimi borykał się standardowy model Wszechświata, Guth niejako nałożył przyspieszone, inflacyjne rozszerzanie się na zwykłą ekspansję standardowego modelu w bardzo wczesnym etapie jego ewolucji. To początkowe rozdzięcie młodego Wszechświata odbyło się tak gwałtowne, że wszystko to, co obecnie obserwujemy przez nawet najsilniejsze teleskopy, kiedyś stanowiło maleńką kroplę pierwotnej plazmy. Fakt ten wyjaśnia, między innymi, dlaczego pewne wielkości, charakteryzujące Wszechświat (na przykład temperatura promieniowania tła), są takie same dla niego całego. Kiedyś bowiem wszystko, co stanowi obecnie obserwowany Wszechświat, znajdowało się bardzo blisko siebie, nic więc dziwnego, że miało podobne własności. Rozumowanie to tak przypadło do gustu większości kosmologów (choć istnieje też opozycja), że mówi się do dziś o „paradygmacie inflacyjnym”. Zbyt wiele problemów pozostałoby bez wyjaśnienia, gdyby nie zakładać, że bardzo młody Wszechświat przeszedł przez fazę inflacji. Hawking i Moss mogli być zadowoleni, gdy uzyskali instanton, produkujący wszechświat w stanie inflacji. Ale na horyzoncie pojawił się nowy problem.

Inflacja w otwartym wszechświecie

Zwolennicy inflacyjnego paradygmatu od dawna twierdzili, że ich model faworyzuje wszechświat z otwartymi, płaskimi przestrzeniami chwilowymi. Co więcej, napływające od

jakiegoś czasu dane obserwacyjne coraz wyraźniej wskazują, że przestrzeń naszego Wszechświata jest istotnie otwarta i jeżeli nie dokładnie płaska, to w każdym razie prawie płaska. Czy stosując metodę Hartle'ego-Hawkinga i przybliżenie instantonowe, da się taki Wszechświat wyprodukować z niczego? Mechanizm inflacji prowadzący do otwartych wszechświatów został opracowany w latach osiemdziesiątych XX wieku przez Sidneya Colemana i F. de Luccie. Potem udało się znaleźć rozwiązanie instantonowe zgodne z tym mechanizmem.

Przejście od stanu zwykłego rozszerzania do stanu ekspansji inflacyjnej jest związane ze zjawiskami dynamicznymi, zachodzącymi w materii wypełniającej młody Wszechświat. Proces ten przypomina proces zamarzania wody. Może się zdarzyć, że zamarza nie od razu cała woda, lecz najpierw tworzą się małe kryształki lodu, które stopniowo obejmują coraz to większe obszary. W procesie Colemana-de Luccii, analogicznie, inflacja tworzy się w małych, ale szybko rosnących bąblach. Było niemałym zaskoczeniem, gdy obliczenia pokazały, że wewnątrz takiego bąbla jest nieskończonym, otwartym wszechświatem. Instantonowe rozwiązanie tego typu opisuje więc kwantowe narodziny wszechświatów otwartych.

Ale i tu nie brak problemów. Instanton Colemana-de Luccii wymaga dość specyficznych warunków początkowych: wszechświat musi znajdować się w stanie tzw. fałszywej próżni. Inflacja nie może zostać zapoczątkowana, jeżeli materia nie tkwi w specyficznym, wzbudzonym stanie. Takie warunki trzeba po prostu przyjąć. Model nie wyjaśnia, skąd się one biorą.

Pomysłowość kosmologów jest jednak wielka. Hawking i Nell Turok skonstruowali instanton o własnościach podobnych do instantonu Colemana-de Luccii, ale nie wymagający jakichś szczególnych warunków początkowych. Problemy wszakże się nie skończyły. Pomysłowość nie zawsze jest w stanie wygrać z prawdziwymi trudnościami. Instanton Hawkinga-Turoka usuwa wprawdzie szczególne warunki początkowe, ale produkuje... osobliwości, czyli takie obszary, w których krzywizna dąży do nieskończoności. Model taki zwykle uważa się za wadliwy lub, w najlepszym razie, tylko za sugerujący kierunek dalszych badań.

Fluktuacje i struktura Wszechświata

Okazuje się jednak, że słabości inflacyjnego scenariusza mogą być użyte na jego korzyść. Różne instantonowe rozwiązania związane z inflacją przewidują - na mocy podstawowych zasad mechaniki kwantowej - fluktuacje kwantowej próżni. W fazie gwałtownego, inflacyjnego rozszerzania się Wszechświata fluktuacje rosną (wraz z jego

rozmiarami). Pod koniec fazy inflacyjnej mogą one osiągnąć rozmiary makroskopowe i stać się zalążkami galaktyk lub ich gromad, gdy Wszechświat stygnie.

Ale zanim się to stanie, fluktuacje odciskają się na strukturze kosmicznego promieniowania tła: promieniowanie rozprasza się na zagęszczeniach materii, co może doprowadzić do dających się dziś zaobserwować niewielkich różnic w rozkładzie jego temperatury. W ten sposób można by wyróżnić to rozwiązanie instantonowe, któremu zawdzięczamy powstanie naszego Wszechświata. Niewykluczone, że planowane na najbliższe lata satelitarne misje badania kosmicznego promieniowania tła doprowadzą do jakichś bardziej) rozstrzygających konkluzji.

ROZDZIAŁ 8

TEORIA M

Ocean struktur

Często wyobrażam sobie matematykę jako bezkresny, nieskończony ocean, wypełniony nie wodą, lecz różnymi pięknymi strukturami. Nie są to struktury martwe, statyczne jak monumentalne architektoniczne kształty. One żyją, są dynamiczne, jedne wynikają z drugich. Ciągami łańcuchów krzyżujących się dedukcji prowadzą od prostych założeń do zaskakujących konsekwencji. Niektóre z nich dają początek nowym wynikaniom, prowadzącym w głąb oceanu - do niezbadanych jeszcze obszarów. Właściwie to, co dotychczas zbadaliśmy, to zaledwie niewielkie wysepki wystające ponad powierzchnię.

Wiemy, że niektóre z wysepki są częściami wielkiego podmorskiego masywu; być może znamy nawet zarysy pewnych jego części, ale reszta tonie w bezkresnym, podwodnym horyzoncie.

Kiedyś żywił się złudną nadzieją, że aby poznać - przynajmniej w zasadzie - cały ocean, wystarczy sformułować kilka wyjściowych pewników i przyjąć odpowiednio mocne reguły wnioskowania, które będą nas w stanie zaprowadzić do najdalszych jego otchłani. Dziś, dzięki pracom Kurta Godła, wiemy, że tak nie jest. Oceanu nie da się wyczerpać za pomocą żadnych zautomatyzowanych sposobów rozumowania.

Niektóre z matematycznych struktur w fizyce wykorzystuje się do modelowania pewnych aspektów świata. Na przykład geometrię Riemanna stosuje się do opisu pola grawitacyjnego, a przestrzenie Hilberta do opisu poziomu kwantowego. Fizyk wybiera z matematycznego oceanu niektóre struktury, by za ich pomocą badać rzeczywisty świat. Jaki jest stosunek tego świata do oceanu matematycznych struktur? Czy nie może się okazać, że dwie odmienne teorie fizyczne wykorzystują dwie pozornie różne matematyczne struktury, które w istocie są tylko wystającymi ponad powierzchnię oceanu dwoma szczytami tego samego podwodnego masywu? Gdyby tak było, te dwie pozornie różne teorie fizyczne stanowiłyby w gruncie rzeczy „fragmenty” jednej, jeszcze nieznannej teorii fizycznej. A może całą fizykę dałoby się w ten sposób sprowadzić do jednej matematycznej struktury? Czy jednak ograniczenia, wynikające z twierdzenia Godła, nie mają konsekwencji dla programu unifikacji fizyki? Czy to, że matematyki nie da się przetłumaczyć na mechaniczną grę symboli, nie świadczy o jej „twórczym charakterze” i czy ów „twórczy charakter” nie przenosi się jakoś na fizykę? Są to pytania ambitne. Nie znamy dziś na nie odpowiedzi, choć wielu z nas snuje na ich temat rozmaite przypuszczenia, a niektórzy biorą je nawet za prawie-pewniki. W obecnym rozdziale pójdziemy tropem tych pytań, starając się Jednak zachować

krytycyzm i trzeźwość myślenia. Zobaczymy, że w najnowszych poszukiwaniach kwantowej teorii grawitacji niektóre zbadane już uprzednio matematyczne wyspy istotnie okazały się szczytami wielkiej podoceanicznej struktury. Struktura ta zaczyna nam już ukazywać szczegóły swojej logicznej konstrukcji. Nie wiemy dotychczas jednego - czy ten piękny podmorski łańcuch górski jest tylko jeszcze jednym elementem abstrakcyjnego świata matematyki, czy też strukturą świata, w którym żyjemy. Wielka Przygoda badania nieznanego trwa.

Struny i superstruny

W rozdziale 5 mówiliśmy o teorii strun i superstrun. Przypomnijmy najważniejsze elementy tych koncepcji i nieco je rozwińmy. Podstawowa idea teorii strun polega na tym, by ogromne bogactwo rozmaitych typów cząstek elementarnych, znanych w fizyce wysokich energii, zastąpić tylko jednym rodzajem obiektów - jednowymiarowymi strunami. Struny mogą być zamknięte (tworząc pętle) lub otwarte, ze swobodnymi końcami. Struny mogą drgać w różny sposób. Rozmaite typy drgań przejawiają się jako odmienne rodzaje cząstek, na przykład jako fotony lub gluony. Fotony przenoszą oddziaływania elektromagnetyczne, a gluony - silne oddziaływanie jądrowe, zwane również hadronowymi. Cząstki przenoszące oddziaływania nazywają się bozonami. Teoria superstrun, w swojej pierwotnej wersji, potrafiła wyjaśnić jako typy drgania strun tylko bozony.

Istnieje wszakże druga rodzina cząstek, zwanych fermionami.

Są to cząstki, z których zbudowana jest „zwykła materia” (do rodziny tej należą na przykład protony i elektrony) i pomiędzy którymi bozony przenoszą różne oddziaływania. Wobec nich teoria strun była bezsilna.

Ale za jakiś czas znalazło się rozwiązanie. Jak pamiętamy, supersymetria została wynaleziona w tym celu, by móc bozony przekształcać w fermiony (i odwrotnie). W oparciu o ten pomysł już wcześniej skonstruowano teorię supergrawitacji, z którą kiedyś wiązano wielkie nadzieje na zunifikowanie wszystkich oddziaływań fizycznych. Wystarczyło teraz teorię strun związać z supersymetria, by ta pierwsza objęła również fermiony. Tak rozszerzoną teorię nazywa się teorią superstrun.

Napisałem w poprzednim zdaniu, że „wystarczyło teraz teorię strun związać z supersymetria”, co sugerowałoby, iż było to zadanie proste. Nic podobnego! Ażeby do tego doprowadzić, należało wykonać ogromną robotę teoretyczną i rachunkową.

Struktury matematyczne, jakich wymagają obecne teorie oddziaływań fundamentalnych, są piękne i być może logicznie proste, ale to wcale nie znaczy, że swoją prostotą są przystosowane do możliwości ludzkiego umysłu. Nigdzie nie zostało powiedziane,

że świat musi być skrojony na miarę naszych poznawczych ambicji. Ale tym razem trudności, przynajmniej częściowo, udało się pokonać i teoria superstrun została skonstruowana. Co więcej, okazało się, że jest pięć różnych teorii superstrun: w dwu z nich podstawowym obiektem są pętle, w trzeciej - struny otwarte. Ponadto istnieją jeszcze dwie teorie powstałe z kombinacji dawniejszej teorii strun bozonowych z supersymetria. Te dwie teorie nazywa się heterotycznymi teoriami strun. Z jedną z tych dwóch teorii, odkrytą w końcu lat osiemdziesiątych XX wieku, wiązano wielkie nadzieje. Okazało się bowiem, że teoria ta zawiera w sobie wszystkie symetrie Modelu Standardowego cząstek elementarnych (ale obejmuje Jeszcze symetrie dodatkowe). Model Standardowy bardzo dobrze zdaje sprawę z bogactwa wszystkich znanych cząstek elementarnych, ale jest nieco sztuczny: opiera się na zbyt wielu niezależnych założeniach. Z teoretycznego (i estetycznego zarazem!) punktu widzenia byłoby rzeczą niezmiernie pożądaną, gdyby dało się go wyprowadzić z jakiejś ogólniejszej koncepcji.

Obecnie nasza wiedza o teoriach superstrun znacznie się poszerzyła i zaczynamy podejrzewać, że właściwa fizyka nie wiąże się z jakąś jedną spośród nich, lecz z jeszcze ogólniejszymi prawidłowościami. Szerszą perspektywę w fizyce uzyskuje się często, przechodząc do przestrzeni o większej liczbie wymiarów. (Właśnie w tym kierunku biegly dociekania teoretyków.

Świat wielkich wymiarów

Teorie superstrun można formułować w przestrzeni o dowolnej liczbie wymiarów, ale jeżeli chcemy, by teoria była wolna od rozbieżności, które są plagą wielu teorii oddziaływań elementarnych, to istnieje tylko jeden wybór - teoria powinna zostać osadzona w przestrzeni o dziesięciu wymiarach. Fizycy bardzo lubią, gdy w ten sposób sama matematyka ogranicza wybór do jednej tylko możliwości. Ale przestrzeń, w której żyjemy, ma trzy wymiary i wraz z czasem tworzy czterowymiarową czasoprzestrzeń. Co z pozostałymi sześcioma wymiarami? Odpowiedź na to pytanie jest znana przynajmniej od lat dwudziestych XX wieku, kiedy to Theodor Kaluza i Oskar Klein wymyślili sposób, w jaki można połączyć ze sobą teorię grawitacji (ogólną teorię względności Einsteina) i teorię elektromagnetyzmu. Założyli oni, że czasoprzestrzeń ma nie 4, lecz 5 wymiarów, ale piąty wymiar jest ciasno zwinięty do postaci rulonika.

Możemy sobie wyobrazić, że w każdym punkcie czasoprzestrzeni tkwi doklejonny okrąg o bardzo małym promieniu; jeżeli więc w czasoprzestrzeni porusza się elektron, to w każdym punkcie ma on dodatkową możliwość poruszania się po małym okręgu.

Przedstawienie tego w języku matematycznym prowadzi do wniosku, że elektron

stosuje się do równań Maxwella, które - jak wiadomo - rządzą zjawiskami elektromagnetyzmu.¹ Jeżeli promień tego dodatkowego okręgu jest bardzo mały, to makroskopowy obserwator nie dostrzeże go jako piątego wymiaru czasoprzestrzeni, lecz jako oddziaływanie elektromagnetyczne.

W przypadku dziesięciowymiarowej teorii superstrun to samo należy uczynić z dodatkowymi sześcioma wymiarami, to znaczy trzeba je zwinąć w 6 ciasnych ruloników, tak by w każdym punkcie czasoprzestrzeni znalazło się dolepionych 6 okręgów o bardzo małych promieniach (czyli jeden sześciowymiarowy torus). Proces ten nazywa się kompaktyfikacją wielowymiarowej przestrzeni. Ruch cząstek w dodatkowych wymiarach mógłby być odpowiedzialny nie tylko za oddziaływanie elektromagnetyczne, lecz również za inne fundamentalne siły (łącznie z grawitacją!).

Opisany proces kompaktyfikacji jest najprostszym z możliwych, ale wkrótce okazał się niewystarczający dla celów fizycznych. Aby otrzymać obserwowane w naszym świecie typy cząstek elementarnych, ich masy i charakteryzujące je liczby kwantowe, trzeba było w każdym punkcie czasoprzestrzeni zastąpić sześciowymiarowy torus bardziej skomplikowanym sześciowymiarowym tworem geometrycznym, zwanym rozmaitością typu Calabiego-Yau. Natrafiamy tu jednak na nową trudność: istnieje bardzo wiele takich rozmaitości i nie wiemy, którą z nich wyróżnia fizyka. Zatem mamy znowu nadmiar wolnego wyboru... Ale badania trwają. Poszukuje się związków między różnymi rozmaitościami typu Calabiego-Yau. Niewykluczone, że wszystkie one są różnymi obliczami czegoś jednego (jak wskazują niektóre prace).

Jest tak dlatego, że oddziaływania elektromagnetyczne podlegają symetrii charakterystycznej dla ruchu po okręgu. Symetrię tę oznacza się symbolem $U(1)$.

Odkrywanie Masywu

Jak już wspomniałem, badanie teorii superstrun wymaga zaawansowanych metod matematycznych. Co więcej, bardzo często trzeba wręcz tworzyć nowe techniki rachunkowe. Nic więc dziwnego, że początkowo teorie te studiowano dość powierzchownie. Nie chcę przez to powiedzieć, że badania były niestaranne, lecz że wypracowane metody matematyczne chwytały za ledwie powierzchniową warstwę bogatej struktury (metody te fizycy nazywają perturbacyjnymi lub zaburzeniowymi). Znane wówczas metody ukazywały jedynie niewielkie wyspy na powierzchni oceanu. Z czasem jednak uczyniono postęp w wypracowywaniu lepszych metod (nieperturbacyjnych).

Zaczęły one stopniowo ukazywać niektóre detale podmorskiego łańcucha, łączącego poszczególne wysepki.

Pierwszym sygnałem, że w gruncie rzeczy chodzi o jedną wielką strukturę, było odkrycie dualności, zachodzących pomiędzy różnymi teoriami superstrun. Dwie teorie nazywamy dualnymi względem siebie, jeżeli - mimo swojej odmiennej postaci - prowadzą do takiej samej fizyki. Zrodziło się więc bardzo poważne podejrzenie, że mamy do czynienia zjedną, ogólniejszą teorią, a 5 znanych teorii superstrun to tylko Jej szczególne przypadki, czyli 5 wystających ponad powierzchnię oceanu szczytów podmorskiego masywu. Masyw ten zaczęto nazywać M-teorią.

Wkrótce okazało się, że masyw ów ma jeszcze jeden szczyt.

Co więcej, szczyt ten tworzy wyspę, którą znano już od dość dawna, ale nie kojarzono jej wcale z pozostałymi pięcioma teoriami. Tą nowo odkrytą, starą wyspą jest jedenastowymiarowa teoria supergrawitacji (por. rozdział 5). Spostrzeżenie to stało się ważnym krokiem w kierunku spenetrowania M-teorii.

Pięć teorii superstrun wymaga 10 wymiarów, a teoria supergrawitacji - 11 wymiarów. Jeśli wszystkie te teorie są szczególnymi przypadkami M-teorii, to ta ostatnia musi być przynajmniej jedenastowymiarowa. Ale jak z jedenastowymiarowej M-teorii otrzymać dotychczasowe dziesięciowymiarowe teorie superstrun? Potrafimy już na to dać odpowiedź: trzeba po prostu skompaktfikować jeden wymiar. Jeżeli na przykład w jedenastowymiarowej teorii supergrawitacji jeden wymiar zwiniemy ciasno wokół okręgu o bardzo małym promieniu, to otrzymamy cieniutką rurkę zlepioną końcami, czyli bardzo chudy torus. Jeśli grubość rurki jest zaniedbywalna, to w efekcie mamy zamkniętą strunę. W ten sposób udało się udowodnić, że jedenastowymiarowa teoria supergrawitacji skompaktfikowana wokół Jednego wymiaru jest niczym innym, jak tylko jedną z pięciu znanych teorii superstrun z zamkniętymi strunami jako swymi podstawowymi obiektami. To, co w teorii tej wydaje się zamkniętą struną, w istocie (to znaczy w jedenastowymiarowej teorii supergrawitacji) jest dwuwymiarową powierzchnią, czyli membraną. Stąd wywodzi się nazwa nowej teorii. M-teoria - od wyrazu „membrana”, a nie od słowa „masyw”, jak z pewnej przekory sugerowałem uprzednio. W ten sposób coraz głębiej penetrując nasz „wielowymiarowy ocean”, zaczynamy stopniowo odkrywać bogatą strukturę M-teorii. Wiemy Już, że ta teoria wymaga 11 wymiarów i że kompaktyfikując jeden z nich na różne sposoby (oraz wykorzystując dualności), możemy otrzymać z niej wszystkie znane teorie superstrun. Jest to niewątpliwie piękna matematyka, ale czy doprowadzi nas ona do poszukiwanej, ostatecznej teorii fizycznej? Pozostało jeszcze wiele do zrobienia i wcale nie jest pewne, że po drodze nie czekają na nas nowe niespodzianki.

ROZDZIAŁ 9

EKPYROTYCZNY WSZECHŚWIAT

M-teoria i kosmologia

Co jakiś czas słyszy się w mediach sensacyjną wiadomość: „Rewolucja w kosmologii! Model Wielkiego Wybuchu już nieaktualny!”. Ostatnio również pojawiają się takie rewelacje, wzmocnione dodatkowymi wykrzyknikami: „Wielkie osiągnięcie uczonych! Wielkiego Wybuchu nie było! Teoria superstrun wyjaśniła początek Wszechświata!”. Naprawdę sprawa przedstawia się znacznie mniej sensacyjnie i bodaj wręcz przeciwnie. Model Wielkiego Wybuchu - a więc stwierdzenie, że w dziejach naszego Wszechświata był supergęsty i supergorący stan, z którego wyewoluowały wszystkie znane nam kosmiczne struktury - jest tak dobrze potwierdzony obserwacyjnie, iż wszelkie nowe koncepcje (w tym także oparte na teorii superstrun) nie starają się go zastąpić, lecz wyjaśnić. W jaki sposób? Oczywiście, w taki sposób, jaki jest ogólnie przyjęty w fizyce. Trzeba zatem zbudować ogólniejszy model lub teorię, z której wynikałby model Wielkiego Wybuchu. Naturalną kandydatką na tę ogólniejszą teorię jest teoria superstrun lub - jeszcze lepiej - M-teoria. Co więcej, podjęcie tego zadania leży w dobrze pojętym interesie tych teorii. Model Wielkiego Wybuchu zajmuje w nauce tak mocną pozycję pod względem obserwacyjnym, że pokazanie, iż wynika on z którejś z tych teorii, byłoby dla niego silnym wsparciem. A jak wiadomo, obie teorie, matematycznie bardzo rozbudowane, cierpią na notoryczny brak obserwacyjnych potwierdzeń. Nic więc dziwnego, że specjaliści od M-teorii i superstrun skierowali swoje zainteresowania w stronę ich kosmologicznych konsekwencji.

Pierwsze pomysły są dość stare i pochodzą od V. A. Ruybakova i M. R. Shaposhnikova z roku 1983, kiedy to idea uogólnienia pojęcia struny do tworu więcej wymiarowego znajdowała się jeszcze w fazie embrionalnej. Przełomowe znaczenie miała dopiero praca P. Hoviavy i E. Wittena z 1966 roku, wykorzystująca już rozwiniętą wersję M-teorii. Nawiązując do wyników uzyskanych w tej pracy, dwa lata później A. Lukas, B. A. Ovrut i D. Waldram stworzyli podstawy tzw. heterotycznej M-teorii, która stanowi dziś punkt wyjścia dla różnych modeli kosmologicznych. Liczba takich modeli gwałtownie rośnie.

Wiele z nich nawiązuje do interesujących prac L. Randalla i R. Sundruma, ale największy rozgłos zdobył sobie model opracowany przez zespół: Justin Houry, Burt A. Ovrut, Paul Steinhardt i Nell Turok, nazwany przez swoich autorów wszechświatem ekpyrotycznym. Określenie to nawiązuje do modelu świata uznawanego przez starożytnych stoików. Wedle tego modelu historia świata jest cykliczna: ognista zagłada, kończąca każdy cykl, daje początek następnemu cyklowi. Zapożyczona od stoików nazwa jest o tyle myląca,

że w modelu współczesnym nie ma mowy o cyklach i ich końcu, lecz jedynie o tym, iż nasz Wszechświat powstał w katastrofie, polegającej na zderzeniu „innych światów”, czyli bran. Przyjrzyjmy się nieco dokładniej scenariuszowi, jaki wedle tego modelu rozegrał się „na początku”.

Założenia modelu

Wiemy już, że w M-teorii podstawowymi obiektami są niekoniecznie jednowymiarowe struny; mogą nimi być dwuwymiarowe membrany lub twory o jeszcze większej liczbie wymiarów.

Przyjęła się dla nich nazwa 3-brany, lub ogólniej n-brany, a jeżeli w danej chwili nie interesuje nas specjalnie liczba wymiarów, mówimy po prostu o branach. Sceną, na której rozgrywa się akcja modelu ekpyrotycznego, jest (4+1)-wymiarowa czasoprzestrzeń (4 wymiary przestrzenne i 1 czasowy) heterotycznej M-teorii. Czasoprzestrzeń ta jest ograniczona dwiema (3+1)wymiarowymi „hiperpowierzchniami”. Obie hiperpowierzchnie interpretuje się jako 3-brany w pięciowymiarowej czasoprzestrzeni. Zauważmy, że obie 3-brany mają dokładnie tyle wymiarów, ile nasz Wszechświat: 3 przestrzenne i 1 czasowy (do nazwy brany wchodzi tylko liczba wymiarów przestrzennych).

I rzeczywiście, jedna z tych 3-bran reprezentuje nasz Wszechświat lub, lepiej, to, co kiedyś stanie się naszym Wszechświatem; nazywa się ją widzialną braną (bo nasz Wszechświat możemy obserwować). Druga 3-brana przedstawia „inny wszechświat” i nazywa się ją ukrytą braną. Pomiedzy obiema branami rozciąga się obszar pięciowymiarowej czasoprzestrzeni; przyjęła się dla niego nazwa objętość obejmująca (bulfe volume). Znacznym uproszczeniem wbudowanym do modelu jest to, że obie brany - widzialna i ukryta - są płaskie (jak czasoprzestrzeń w szczególnej teorii względności), ale objętość obejmująca może być zakrzywiona (wzdłuż jednego z wymiarów).

W modelu istnieje jeszcze trzecia brana, zwana braną objętościową. Może ona albo pojawić się spontanicznie w pobliżu brany ukrytej, albo z tej brany wręcz „wypączkować”. Obydwie te możliwości dokonują się na mocy pewnej wersji efektu kwantowej kreacji (por. rozdział 7). Ażeby model mógł zadziałać, brana objętościowa musi być również płaska, dokładnie równoległa do pozostałych dwu bran, znacznie od nich lżejsza i początkowo powinna znajdować się w spoczynku. Są to bardzo poważne ograniczenia nałożone na model.

Scenariusz początku Autorzy modelu ekpyrotycznego w swoim oryginalnym artykule piszą, że „Wszechświat mógł istnieć nieskończenie długo w okresie poprzedzającym kolizję, ale czas kosmiczny, tak jak bywa on zwyczajnie definiowany, rozpoczął się w zderzeniu”.

Zdanie to jest bardzo niejasne. Zauważmy, że scenę dla modelu stanowi

pięciowymiarowa czasoprzestrzeń, a więc czas jest jednym z jej wymiarów i właśnie w tym czasie „Wszechświat mógł istnieć nieskończenie długo”. Nie był to jednak czas „naszego Wszechświata” (który się jeszcze nie pojawił), lecz raczej jakiś „meta-czas” dla różnych możliwych wszechświatów (3-bran). Nasz czas rozpoczął się w kataklizmie zderzenia. Oto jak do tego doszło.

Brana objętościowa albo powstała w pobliżu brany ukrytej, albo się od niej oderwała. Z chwilą gdy zaistniała, zaczęła doznawać przyciągania ze strony brany widzialnej. W ten sposób brana objętościowa rozpoczęła swoją podróż wzdłuż jednego z wymiarów pięciowymiarowej czasoprzestrzeni w kierunku brany widzialnej. W trakcie podróży zachowała swoją płaskość i równoległość do pozostałych dwu bran, ale działanie kwantowych efektów powodowało powstawanie na niej małych zmarszczek-fluktuacji. Istotną rzeczą jest to, że model przewiduje ich charakter i wielkość. W miarę poruszania się brany w pięciowymiarowej czasoprzestrzeni większe fluktuacje - powyżej pewnej skali wielkości - zamrażają się (tzn. ich wielkość przestaje się zmieniać), a poniżej tej skali wykonują oscylacje.

Wreszcie następuje kataklizm.

Brana objętościowa zderza się z braną widzialną. Część energii kinetycznej, powstałej w wyniku kolizji, zmienia się w ciepło. Rodzą się wielkie ilości energii promienistej. Wszystko skąpane w gorącej kąpieli. Zderzenie to Jest w gruncie rzeczy Wielkim Wybuchem, dającym początek naszemu Wszechświatowi. Dalej wszystko rozgrywa się zgodnie ze standardowym modelem kosmologicznym. Jednakże model zderzenia bran wnosi dwa istotne elementy do modelu standardowego. Po pierwsze, w historii naszego Wszechświata nigdy nie było kłopotliwej początkowej osobliwości. Zderzenie bran można uważać za gigantyczną katastrofę w skali kosmicznej (katastrofę, której zawdzięczamy nasze istnienie!), ale mimo wszystko nie jest to osobliwość w sensie matematycznym. I po drugie, w modelu ekpyrotycznym nie trzeba przyjmować warunków początkowych dla Wielkiego Wybuchu a priori, niejako „z powietrza” (jak to się czyni w kosmologii standardowej), są one bowiem ustalone przez fizykę zderzenia.

Obszar zderzenia dwóch bran był nieporównywalnie większy od tego „zaniedbywalnie małego fragmentu”, z którego powstał nasz Wszechświat. Nic zatem dziwnego, że wszystko wewnątrz naszego Wszechświata, choćby obecnie oddzielone największymi odległościami, jest ze sobą przyczynowo powiązane. A zatem celem wyjaśnienia niektórych globalnych charakterystyk Wszechświata, na przykład tego, że temperatura mikrofalowego promieniowania tła jest wszędzie niemal identycznie taka sama, nie trzeba odwoływać się do

modelu inflacyjnego (por. rozdział 7). W związku z tym Paul Steinhardt, kiedyś wielki badacz i zwolennik kosmicznej inflacji, przeszedł teraz do obozu jej przeciwników.

Model inflacyjny przewidywał, że przestrzeń Wszechświata jest płaska. Cały bowiem nasz obserwowalny świat rozdał się do obecnych rozmiarów właśnie dzięki inflacji; stanowi więc mały fragment jakiejś większej przestrzeni, dziś dla nas nieobserwowalnej w całości. A mały fragment dowolnie zakrzywionej przestrzeni jest zawsze w przybliżeniu płaski. Przybliżenie jest tym lepsze, im mniejszy fragment obserwujemy. W modelu zderzenia dwu bran świat jest płaski „w naturalny sposób”, ponieważ - jak pamiętamy - model funkcjonuje tylko wówczas, gdy wszystkie trzy brany, występujące w scenariuszu zderzenia, są płaskie.

Model ekpyrotyczny może się poszczycić jeszcze jedną prognozą. Na branie objętościowej, w trakcie jej wędrówki w kierunku brany widzialnej, powstają kwantowe fluktuacje. Jak wiemy, ich wielkość jest dobrze określona. W akcie zderzenia fluktuacje „odciskają się” na branie widzialnej, skutkiem czego w nowo narodzonym Wszechświecie fluktuacje - i to o ściśle określonej wielkości - są obecne od samego początku. To one staną się potem zarodkami galaktyk i ich gromad. Stwarza to możliwości, przynajmniej teoretycznego, testowania modelu.

Już obecnie mierzy się ze znaczną precyzją wielkość początkowych fluktuacji zapisanych w mikrofalowym promieniowaniu tła, a planowane na najbliższą przyszłość misje satelitarne dokładność tę istotnie zwiększą. Możemy żywić uzasadnioną nadzieję, że uda się wówczas rozstrzygnąć, czy rację ma model inflacyjny, czy model zderzających się bran.

Chwila na refleksję

Śledzenie najnowszych wyników badań jest czymś niezmiernie emocjonującym. Wrażenie, że oto trzyma się rękę na pulsie i że jest się świadkiem pierwszej linii badań, bywa frapujące. Niekiedy jednak jest w stanie przyćmić fakt, iż te najnowsze osiągnięcia mogą być tylko wstępną hipotezą. Dopiero po chwili spokojniejszej refleksji nabiera się odpowiedniego dystansu i przychodzi czas na bardziej wyważoną ocenę.

Model Wielkiego Wybuchu jako dwu zderzających się ze sobą bran jest pod wieloma względami atrakcyjny. Przede wszystkim pozwala on uniknąć początkowej osobliwości i traktuje sam Wielki Wybuch jako skutek poprzedzających go procesów fizycznych. Co więcej, czyni to w ramach szerszej teorii, i to mającej ambicję, by być teorią fundamentalną całej fizyki.

Ale w tym tkwi także słabość modelu. Jak bowiem wiemy, M-teoria ciągle jeszcze znajduje się we wstępnej fazie swojego rozwoju i podczas dokładniejszego jej opracowywania wiele się jeszcze może zmienić.

Innym poważnym mankamentem modelu ekpyrotycznego jest to, że wydaje się on bardzo „szczególnym przypadkiem”.

Wprawdzie - jak podkreślają jego autorzy - dostarcza on warunków początkowych dla modelu Wielkiego Wybuchu (który warunki te musiał zakładać a priori), ale sam wymaga zaistnienia bardzo nietypowej sytuacji. W odpowiedniej odległości od siebie w pięciowymiarowej czasoprzestrzeni muszą znaleźć się dwie, dokładnie równoległe względem siebie, płaskie 3-brany. W pobliżu jednej z nich powinna powstać trzecia brana, dużo lżejsza od pozostałych dwu, która - poruszając się w odpowiedni sposób i w odpowiednim kierunku - zderzy się wreszcie z drugą braną.

To wszystko wymaga przyjęcia bardzo szczególnych warunków początkowych dla całego procesu. Niewątpliwie, wkrótce pojawią się dalsze prace, które ulepszą model ekpyrotyczny i, być może, złagodzą lub nawet usuną niektóre z jego zbyt mocnych założeń.

Wydaje się jednak, że problemu warunków początkowych nie da się w tym scenariuszu całkowicie uniknąć; można go jedynie przesunąć do jakichś jeszcze wcześniejszych procesów.

Model ekpyrotyczny natrafia na jeszcze inną, poważną trudność, tym razem natury pojęciowej. „Dzieje się” on w czasoprzestrzeni, tyle że o liczbie wymiarów o jeden większej niż zwykła ogólna teoria względności. Pod tym względem model ekpyrotyczny jest krokiem wstecz w stosunku do tych poszukiwań kwantowej teorii grawitacji, wedle których na poziomie fundamentalnym nie ma ani czasu, ani przestrzeni w ich zwykłym rozumieniu. A jeżeli nie ma czasu i przestrzeni, to może obiektami najbardziej fundamentalnymi nie są ani 1-brany (struny), ani 2-brany (membrany), ani 3-brany, ani nawet n-brany, lecz... zero-brany? Istnieje taka koncepcja. Wrócimy do niej w ostatnim rozdziale.

ROZDZIAŁ 10

STRUKTURA POCZĄTKU I KOŃCA

Rywale

Rogera Penrose’a żadnemu fizykowi-relatywiście nie trzeba przedstawiać. Lata sześćdziesiąte XX wieku zapoczątkowały prawdziwy wybuch nowych metod matematycznych w teorii względności oraz przyległych dyscyplinach, takich jak kosmologia i astrofizyka relatywistyczna. U podstaw wielu spośród tych metod leżały pomysły Penrose’a. Wprawdzie teoria twistorów dotychczas nie dostarczyła uniwersalnej metody kwantowania, jak tego oczekiwał jej twórca, Roger Penrose, ale stała się nowym. Interesującym terenem badań, który już od dość dawna przyciągnął uwagę także „czystych matematyków”.

Trwałym osiągnięciem Penrose'a są słynne twierdzenia o występowaniu osobliwości w dużej klasie czasoprzestrzeni, wykorzystywanych do badania struktury Wszechświata lub późnych stadiów ewolucji masywnych gwiazd. Chociaż sławą, płynącą z udowodnienia różnych twierdzeń tego typu, Penrose musiał podzielić się z innymi (Hawkingiem, Gerochem, Ellisem...), to on Jednak wpadł na trop właściwej metody, on udowodnił pierwsze twierdzenie i potem, razem z Hawkingiem, skonstruował żmudny dowód innego twierdzenia, które do dziś (po pewnych udoskonaleniach) jest uważane za jedno z najbardziej skutecznych narzędzi wykrywających stan osobliwy w historii Wszechświata i kolapsujących gwiazd. Nazywa się je twierdzeniem Hawkinga-Penrose'a. Powstało ono w twórczym okresie współpracy tych dwu uczonych. Potem ich drogi zaczęły się rozchodzić.

Stephena Hawkinga i niektórych jego współpracowników spotkaliśmy na kartach poprzednich rozdziałów. Hawking, zdecydowanie bardziej fizyk niż matematyk, zwrócił się - jak widzieliśmy - w kierunku budowania półklasycznych modeli tych zjawisk, dla których w pełni kwantowe metody były jeszcze niedostępne. Osiągnął on w ten sposób doraźne sukcesy, odważnie zmuszając matematyczne metody kwantowe do współpracy z metodami teorii względności. Roger Penrose wybrał inną drogę. Jego umysłowość rasowego matematyka-geometry nie mogła zadowolić się półklasycznymi metodami i doraźnymi wynikami. Trawiła go ambicja podstaw. Szukał zupełnie nowych metod matematycznych, które za jednym zamachem rozwiązałyby najważniejsze problemy współczesnej fizyki, przede wszystkim problem kwantowania grawitacji (czy bardziej w języku geometrycznym - kwantowania czasoprzestrzeni). Ale Penrose nie szukał w zupełnych ciemnościach. Prowadziły go głębokie przemyślenia dotyczące nierozwiązanych i - że tak powiem - granicznych problemów fizyki i kosmologii (granicznych, czyli takich, w których to, co wiemy, zdaje się o włos graniczyć z poszlaką mogącą doprowadzić do rozwiązania). Tego rodzaju przemyślenia nie mogły nie poruszyć strun typowo filozoficznych. Natura matematyki (jak istnieją obiekty matematyczne?), stosunek matematyki do fizycznego świata, istota świadomości i zagadnienia związane z tzw. sztuczną inteligencją - to tematy, które coraz częściej pojawiały się w artykułach Penrose'a.

Jak wspomniałem na wstępie, mimo rozlicznych i naprawdę ważnych osiągnięć „po drodze”, dotychczasowe prace Penrose'a nie dały oczekiwanego wyniku: zagadnienie kwantowania czasoprzestrzeni nadal czeka na jakiś radykalnie nowy pomysł (a może na ideę, która od dawna jest już w zasięgu ręki, ale szukając po omacku, nie można jej uchwycić). Jednakże Penrose doszedł do wniosku (może sprowokowany popularną książką Hawkinga), że pora już zebrać swoje przemyślenia - zarówno filozoficzne, jak i te, które miały

doprowadzić do Wielkiej Teorii - w postaci zwartej całości. W ten sposób powstały dwie jego książki *The Emperor's New Mind* oraz *Shadows of the Mind*. W dalszym ciągu tego rozdziału pragnę omówić jedynie kosmologiczną część przemyśleń Penrose'a. W Jego przekonaniu podstawy kosmologii łączą się z podstawami fizyki, a geneza Wszechświata to w istocie ten sam problem (lub najwyżej pewna Jego odmiana), co kwestia pochodzenia czasu i poszukiwanej przez wszystkich kwantowej teorii grawitacji.

O entropii geometrycznie

Zagadnienie śmierci cieplnej Wszechświata ma już długą historię. Popularność tej hipotezy jest w pełni godna liczby nieporozumień i błędów, jakie w związku z nią popełniono.

Różnice temperatur we Wszechświecie ulegają wyrównaniu.

Z chwilą gdy gwiazdy wystygną, a ogromne przestrzenie kosmiczne zostaną nieznacznie podgrzane gwiazdnym promieniowaniem, Wszechświat zamrze termicznie, zawarta w nim energia będzie niezdolna do wykonania jakiegokolwiek pracy.

Miarą tego rodzaju bezużyteczności energii jest wielkość zwana przez fizyków entropią. Im większa entropia jakiegoś układu, tym energia w nim zawarta bardziej bezużyteczna. Całą hipotezę można więc wyrazić w stwierdzeniu: entropia we Wszechświecie rośnie, a gdy osiągnie wartość maksymalną - nastąpi jego śmierć cieplna.

Hipoteza ta (która w swej istocie jest ekstrapolacją drugiej zasady termodynamiki na cały Wszechświat) wiąże się z jeszcze jednym interesującym problemem z pogranicza fizyki i filozofii.

Nikt w to nie wątpi, że czas płynie z przeszłości w przyszłość. Ale wszystkie znane prawa fizyki są nieczułe na zmianę kierunku czasu, a więc nie mogą go wyznaczać. Z jednym wyjątkiem.

Jest nim prawo wzrostu entropii (w układach izolowanych). Jeżeli entropia istotnie wszędzie we Wszechświecie rośnie, to można przyjąć, że to ona wyznacza kierunek upływu czasu (strzałkę czasu): spośród dwu stanów Wszechświata ten jest późniejszy, który odznacza się większą entropią.

Prawie każde zdanie z ostatnich dwu akapitów mogłoby stanowić przedmiot długich dyskusji. Nie chcę ich teraz podejmować. Proszę tylko Czytelnika, by akapity te potraktował jako pewnego rodzaju nakreślenie scenerii, w jakiej rozegra się akcja przemyśleń Rogera Penrose'a.

W przemyśleniach Penrose'a ważną rolę pełni pojęcie entropii (jest ono wykorzystane przez niego w wysoce niestandardowy sposób), ale - jak już wspominałem - Penrose myśli

geometrycznie. Trzeba więc zacząć od określenia entropii w języku geometrii (to jeszcze ciągle nie będzie oryginalnym pomysłem tego uczonego, ale wyciągnie on z niego oryginalne wnioski).

Właściwym środowiskiem dla geometrycznego określenia entropii jest przestrzeń fazowa. Mówiliśmy o niej w rozdziale 4, ale - dla przypomnienia - powtórzmy to, co najważniejsze. Dla każdego układu fizycznego można zdefiniować jego przestrzeń fazową. Jest to przestrzeń, której punktami są stany, w jakich układ może się znajdować. Stan układu w fizyce klasycznej jest określony przez położenia i pędy wszystkich cząstek wchodzących w skład tego układu. W trójwymiarowej przestrzeni wektory położenia i pędu mają po trzy składowe. Jeżeli więc rozważany układ składa się z n cząstek, to każdy jego stan, czyli każdy punkt przestrzeni fazowej, jest określony przez $(3+3)n = 6n$ liczb (współrzędnych w przestrzeni fazowej). Przestrzeń fazowa takiego układu ma zatem $6n$ wymiarów.

Ewolucja układu fizycznego polega na ciągłym przechodzeniu od jednego stanu do drugiego, czyli odpowiada jej krzywa w przestrzeni fazowej. Na tym właśnie polega siła tej metody: badanie dynamiki układu (jego ewolucji) sprowadza się do badania geometrii krzywych w przestrzeni fazowej.

A teraz ważne spostrzeżenie: stan makroskopowy układu może zostać zrealizowany przez wiele stanów mikroskopalnych.

Na przykład stan makroskopowy, polegający na równomiernym rozłożeniu gazu w cylindrze, może być zrealizowany przez bardzo wiele rozkładów konkretnych cząstek, czyli stanów mikroskopowych. Dla danego stanu makroskopowego nie jest istotne, czy pewna konkretna cząstka gazu znajduje się w prawym dolnym rogu cylindra, czy też w lewym górnym; istotne jest tylko, czy cząstki gazu były rozmieszczone równomiernie.

Jest dalej rzeczą oczywistą, że większe szansę urzeczywistnienia mają te stany makroskopowe, które mogą być zrealizowane przez większą liczbę stanów mikroskopowych, gdyż prawdopodobieństwo zajścia pierwszych jest większe od prawdopodobieństwa zajścia drugich.

Podzielmy teraz przestrzeń fazową na obszary w ten sposób, by do danego obszaru należały wszystkie stany mikroskopowe realizujące ten sam stan makroskopowy. Okazuje się, że przestrzeń fazowa rozpadnie się na bardzo nierówne obszary. Największy obszar, obejmujący prawie całą przestrzeń fazową, będzie grupować te stany mikroskopowe, które realizują stan równowagi (równomiernego rozmieszczenia cząstek w cylindrze). Wszystkie inne obszary okażą się znacznie mniejsze, a pewne spośród nich - te, których prawdopodobieństwo zajścia jest znikomo małe (na przykład wszystkie cząstki gazu w

jednym rogu cylindra) - będą wręcz mikroskopijnych rozmiarów. Jeśli, na przykład, cylinder ma 1 metr sześcienny objętości i zawiera powietrze atmosferyczne pod zwykłym ciśnieniem oraz w zwykłej temperaturze, to obszar w przestrzeni fazowej odpowiadający równomiernemu rozmieszczeniu powietrza w całym cylindrze będzie około 10^{10} razy większy od obszaru w przestrzeni fazowej, który odpowiada skoncentrowaniu całego powietrza w rogu cylindra o wymiarach centymetra sześciennego. Tego rodzaju podział przestrzeni fazowej na obszary nazywa się ziarnista struktura przestrzeni fazowej.

Przejdźmy teraz do omówienia entropii. Charakteryzuje ona makroskopowy stan układu i wiąże się z objętością tego obszaru przestrzeni fazowej, który odpowiada danemu stanowi makroskopowemu, w ten sposób, że większym obszarom przypisywana jest większa entropia¹. Największą entropią charakteryzuje się stan, któremu odpowiada obszar o maksymalnej objętości w przestrzeni fazowej, czyli stan równowagi.

Wyobraźmy sobie teraz, że układ znajduje się w dowolnym stanie (makroskopowym), różnym od stanu równowagi, i zaczyna błądzić losowo po całej przestrzeni fazowej. Oczywiście, prawdopodobieństwo trafienia do większych obszarów jest większe niż prawdopodobieństwo trafienia do obszarów mniejszych. A zatem entropia układu, średnio rzecz biorąc, będzie rosła. Ponieważ stanowi równowagi odpowiada obszar znacznie większy od wszystkich innych obszarów w przestrzeni fazowej, układ wkrótce osiągnie stan równowagi, a prawdopodobieństwo samorzutnego opuszczenia tego stanu przez układ będzie znikomo małe; a gdy mimo wszystko się zdarzy, układ znowu bardzo szybko powróci do stanu równowagi.

Język geometrii przestrzeni fazowej, w połączeniu ze statystycznymi własnościami entropii, okazał się bardzo skuteczny: wyjaśnił on „mechanizm” funkcjonowania drugiej zasady termodynamiki. Ale już najwyższa pora przejść do pytań o charakterze kosmologicznym.

Entropia i Wszechświat

Spróbujmy przeprowadzić nasz myślowy eksperyment z błądzeniem po przestrzeni fazowej przy założeniu, że czas płynie w odwrotnym kierunku - z teraźniejszości w przeszłość.

Znajdujemy się w jakimś mało prawdopodobnym stanie (mały obszar w przestrzeni fazowej) i zaczynamy przesuwać się losowo po przestrzeni fazowej (wstecz w czasie). Oczywiście, wkrótce natrafimy na największy obszar, w którym pozostaniemy na zawsze (nie licząc małych fluktuacji wokół stanu równowagi - krótkotrwałych opuszczeń największego obszaru). Ponieważ z założenia poruszaliśmy się wstecz w czasie, nasz model przepowiada,

że każdy układ fizyczny rozpoczyna swoją ewolucję od stanu o maksymalnej entropii w przeszłości. Jest to ewidentnie fałszywa przepowiednia, gdyż - jak uczy termodynamika - każdy układ fizyczny ewoluuje od stanów o niskiej entropii do stanu równowagi o maksymalnej entropii. A zatem nasz geometryczny model wyjaśnia tylko „połowę” drugiej zasady termodynamiki, tę mianowicie, która odnosi się do przyszłości. Model zastosowany do przeszłości „pracuje fałszywie”.

Ściśle rzecz biorąc, nasz geometryczny model przewiduje, że gdy układ fizyczny nie jest poddany jakimś dodatkowym więzom, jego entropia powinna wzrastać w obydwu kierunkach czasowych, począwszy od stanu obecnego. Wniosek stąd następujący: ponieważ w obserwowanym Wszechświecie entropia maleje w kierunku przeszłości, a rośnie tylko ku przyszłości, Wszechświat Jako całość musi być poddany działaniu jakichś więzów. Zmusiły one ewolucję Wszechświata do wystartowania ze stanów z bardzo małą entropią. Co to za więzy? Nasuwa się dość naturalne przypuszczenie: poszukiwanym więzem jest Wielki Wybuch. Ale jak Wielki Wybuch mógł zawiesić działanie praw termodynamiki? Rzecz w tym, że wcale nie zawiesił. Materia wypełniająca Wszechświat w Wielkim Wybuchu znajdowała się w stanie równowagi, bo taki stan był najbardziej prawdopodobny. A zatem Wszechświat już wtedy był w stanie charakteryzującym się maksymalną entropią. Ponieważ jednak Wszechświat miał wówczas bardzo małe rozmiary, maksymalna dopuszczalna wówczas entropia była o wiele mniejsza niż maksymalna entropia dopuszczalna w dzisiejszej epoce. Dzięki temu entropia, choć mała w przeszłości, systematycznie rosła wraz z upływem czasu. Jeżeli to wyjaśnienie jest słuszne, to druga zasada termodynamiki niesie informacje o znaczeniu kosmologicznym.

Jednakże i tym razem rodzą się poważne zastrzeżenia. Jak wiadomo, jedna z wersji kosmologicznego scenariusza przewiduje, że rozszerzanie się Wszechświata zamieni się kiedyś w jego kurczenie, które będzie trwać aż do momentu, gdy zapadnie się on do końcowej osobliwości. W tej wersji scenariusza entropia końcowych stanów Wszechświata (choć maksymalna) musiałaby być również mała, co oczywiście wymagałoby radykalnego przeformułowania znanej nam dziś drugiej zasady termodynamiki. Nie jest to wykluczone, ale wysoce nieprawdopodobne wobec tego, co mówi fizyka czarnych dziur.

Entropia czarnych dziur

Masywne gwiazdy (o masach przekraczających 2,5 masy Słońca) kończą zazwyczaj swoją ewolucję jako czarne dziury. Gdy równowaga pomiędzy ciśnieniem promieniowania i samograwitacją stygnącej gwiazdy zostanie zachwiana, gwiazda zaczyna się gwałtownie kurczyć, jej gęstość rośnie, a wraz z nią rośnie również natężenie pola grawitacyjnego

gwiazdy. Gdy natężenie to staje się tak duże, że nic, nawet promień światła, nie może uciec poza pewien obszar otaczający gwiazdę, mówimy, że gwiazda osiągnęła stadium czarnej dziury. Jak pamiętamy (rozdział 6), granicę krytycznego obszaru, z którego nie ma już ucieczki, nazywa się horyzontem czarnej dziury.

Jacob Bekenstein i Stephen Hawking, niezależnie od siebie, odkryli rzecz bardzo interesującą: entropia czarnej dziury jest proporcjonalna do powierzchni jej horyzontu. W przypadku sferycznej czarnej dziury prowadzi to do wniosku, że entropia czarnej dziury na jednostkę jej masy jest proporcjonalna do masy czarnej dziury. Suma entropii dwu czarnych dziur jest mniejsza od entropii jednej czarnej dziury, powstałej na skutek wzajemnego połknięcia się dwu czarnych dziur. Początkowo wzór Bekensteina-Hawkinga traktowano tylko jako pewnego rodzaju analogię ze zwykłą termodynamiką, ale późniejsze prace Hawkinga wykazały, że można pełnoprawnie mówić o termodynamice czarnych dziur, która okazuje się grawitacyjnym odpowiednikiem zwykłej termodynamiki.

Celem lepszego zrozumienia fizycznej natury entropii czarnych dziur sięgnijmy do poglądowego artykułu Bekensteina poświęconego tej problematyce. Jak dobrze wiadomo, w fizyce statystycznej entropia służy jako miara utraty informacji. Na przykład entropia kostki cukru mierzy naszą niewiedzę dotyczącą mikroskopowych stanów cząsteczek tworzących tę kostkę, podczas gdy jej stan makroskopowy (skład chemiczny, temperatura, objętość itp.) jest nam dobrze znany. Entropia czarnej dziury także mierzy naszą (tzn. obserwatora zewnętrznego w stosunku do czarnej dziury) niewiedzę, ale tym razem niewiedza jest znacznie bardziej drastyczna; dotyczy ona wszystkiego, co wpadnie do czarnej dziury. Obserwator zewnętrzny może znać tylko masę, ładunek elektryczny i moment obrotowy czarnej dziury; wszelkie inne informacje o tym, co dzieje się pod horyzontem czarnej dziury, są dla niego niedostępne. Nic więc dziwnego, że entropia czarnych dziur jest dużo większa od zwykłej entropii termicznej tych obiektów.

Jednym z ważniejszych źródeł informacji o procesach fizycznych, jakie odbywały się w młodym Wszechświecie, jest mikrofalowe kosmiczne promieniowanie tła. Jest to promieniowanie odpowiadające promieniowaniu ciała doskonale czarnego o temperaturze 2,7 K, równomiernie wypełniające całą przestrzeń. Dokładne badania wykazały, że na jedną cząstkę, taką jak proton lub neutron (czyli na jeden barion), przypada 10⁸ fotonów promieniowania tła. W przekładzie na język termodynamiki znaczy to, że entropia wiosna materii wypełniającej Wszechświat, czyli entropia przypadająca na jeden barion, wynosi 10⁸ (w jednostkach naturalnych, w których stała Boltzmann jest równa jedności). Jeżeli (umownie!) przyjąć, że we Wszechświecie znajduje się 10⁸⁰ barionów (już Arthur Eddington

tak właśnie szacował liczbę protonów we Wszechświecie), to jego całkowita entropia wynosiłaby 1088.

Kosmologowie od dawna byli pod wrażeniem wielkości tej liczby. Jak wytłumaczyć, skąd we Wszechświecie wzięła się tak wielka entropia? Ale Penrose wylewa wiadro zimnej wody na głowy kosmologów. Czy ta wartość jest naprawdę wielka? Policzmy, według wzoru Bekensteina-Hawkinga, (grawitacyjną) entropię przypadającą na jeden barion w czarnej dziurze o masie Słońca. Entropia ta, Jak się okazuje, wynosi 10^{20} . Gdyby więc Wszechświat składał się z samych takich czarnych dziur, jego całkowita entropia wynosiłaby 10^{100} .

Bądźmy jednak nieco bardziej realistyczni i zaludnijmy Wszechświat galaktykami, z których każda składa się z 10^{11} gwiazd i skrywa w swoim jądrze czarną dziurę o masie równej 10^6 mas Słońca. Dla takiego Wszechświata formuła Bekensteina-Hawkinga daje na entropię przypadającą na jeden barion wielkość 1021, czyli określa całkowitą entropię świata na 10^{101} .

Załóżmy, że z czasem czarne dziury, znajdujące się w jądrach galaktyk, połkną wszystkie gwiazdy w danej galaktyce, tworząc jedną wielką czarną dziurę. Entropia na barion takiej konfiguracji wynosi 10^{31} , a całkowita entropia świata - 10^{111} .

Załóżmy wreszcie, że cały ten proces odbywa się w zamkniętym modelu kosmologicznym, w którym rozszerzanie przechodzi w kurczenie i przy końcu ewolucji wszystko staje się jedną gigantyczną czarną dziurą, prowadzącą do końcowej osobliwości. Entropia na barion wynosi teraz 10^{43} , czyli całkowita entropia „końca świata” - 10^{123} .

Jak wyjaśnić tę ogromną liczbę? Oto jest pytanie.

Termodynamika w pracowni Pana Boga Przejdźmy znowu na język geometrii. Łatwo wyliczyć, że ogromnej entropii 10^{123} odpowiada obszar w przestrzeni fazowej o objętości 10^{10} . O tym. Jak ogromna jest to liczba, niech świadczy fakt, że gdyby każde zero występujące w niej po Jedyńce zanotować na jednym protonie lub neutronie, to we Wszechświecie zabrakłoby miejsca, by tę liczbę zapisać. Przypomnijmy, że objętość ta jest miarą entropii stanów Wszechświata w pobliżu jego końcowej osobliwości; nazwijmy ją po prostu końcową entropią Wszechświata.² Warto porównać końcową entropię Wszechświata z jego entropią początkową. Za początkową entropię Wszechświata przyjmijmy entropię zawartą w obecnym kosmicznym promieniowaniu tła, czyli 1088; odpowiadająca Jej objętość w przestrzeni fazowej wynosi 10^{10} . Jeśli nawet entropia na początku była mniejsza, to i tak wobec ogromu entropii końcowej, równającej się 10^{123} , i odpowiadającej Jej objętości w przestrzeni fazowej 10^{10} , nie ma to żadnego znaczenia. Jak łatwo wyliczyć, stosunek tych dwu objętości wynosi 1: 10^{102} Rozumowanie Penrose’a ma charakter roboczy. Roboczo też przyjmuje on, że świat jest zamknięty i zawiera końcową osobliwość. Cate rozumowanie

można by też przeprowadzić dla świata otwartego, który nie ma końcowej osobliwości, ale wymagałoby to dodatkowych metod geometrycznych.

Zastanówmy się przez chwilę nad tą niesamowitą liczbą.

Wyraża ona prawdopodobieństwo wyboru świata, w którym obowiązuje druga zasada termodynamiki (tak jak w naszym Wszechświecie) spośród wszystkich możliwych wszechświatów. Penrose posługuje się następującym obrazem. Wyobraźmy sobie, że Bóg kontempluje przestrzeń fazową. Każdy jej punkt reprezentuje możliwy stan jakiegoś wszechświata, a każda krzywa - jego ewolucję. Bóg postanawia rzucić szpilkę na przestrzeń fazową i stworzyć ten świat, którego stan początkowy wskaże koniec szpilki. Jakie Jest prawdopodobieństwo, że zostanie wybrany świat podobny do naszego, z drugą zasadą termodynamiki i kierunkiem czasu określonym przez wzrost entropii? Prawdopodobieństwo to jest niesamowicie małe i wynosi $1: 10^{10}$. Innymi słowy, byłoby irracjonalnie nierozsądne przyjąć, że Bóg, stwarzając świat, kierował się przypadkiem. Ten absurdalnie nieprawdopodobny model świata, jaki Pan Bóg skierował do realizacji, musiał czymś bardzo szczególnym skupić na sobie jego uwagę. Co to mogło być?

Struktura osobliwości

Zarówno początkowa, jak i końcowa osobliwość w standardowym modelu kosmologicznym (rozważanym przez Penrose'a) należą do osobliwości krzywiznowych. Gdy zbliżamy się do takich osobliwości, krzywizna czasoprzestrzeni rośnie nieograniczenie. W teorii względności krzywizna czasoprzestrzeni jest opisywana przez tensor krzywizny, zwany także tensorem Riemanna.

Tensor krzywizny jest bogatym tworem geometrycznym. Można w nim wyróżnić dwie części. Działanie jednej z tych części na czasoprzestrzeń powoduje jej odkształcenie, ale zachowuje objętość; tę część tensora krzywizny nazywa się tensorem Weyla. Działanie drugiej części tensora krzywizny na czasoprzestrzeń powoduje jej ścisnienie lub rozprężanie, a więc zmienia objętość; tę jego część nazywa się tensorem Ricciego. Symbolicznie można to zapisać w postaci: $RIEMANN = WEYL + RICCI$. Okazuje się, że przy zbliżaniu się do typowej osobliwości część Weyla tensora krzywizny dąży do nieskończoności: $WEYL \rightarrow \infty$. Ale istnieją bardzo wyjątkowe osobliwości krzywizny, przy zbliżaniu się do których tylko $RICCI \rightarrow a^0$. Osobliwość początkowa w modelu standardowym należy właśnie do tego rodzaju niezwykle wyjątkowych osobliwości. Są one, w pewnym sensie, bardzo gładkie, tzn. zbliżając się do nich, czasoprzestrzeń tylko się kurczy, ale nie ulega odkształceniom. Penrose przyjmuje, że takie osobliwości odznaczają się bardzo małą entropią grawitacyjną. Natomiast osobliwości, w których $WEYL \rightarrow \infty$, przeciwnie, są „postrzępione”. Czasoprzestrzeń w ich

poblizu nie tylko ulega skurczeniu, ale również rozmaitym odkształceniom. Według Penrose'a odznaczają się one dużą entropią grawitacyjną.

A zatem całą analizę przeprowadzoną w poprzednim akapicie można ująć w stwierdzeniu: osobliwość początkowa naszego Wszechświata była szczególna, odznaczała się ona bardzo małą entropią grawitacyjną, czyli należała do osobliwości, dla których $WEYL = 0$; natomiast osobliwość końcowa będzie typowa, o dużej entropii z $WEYL \rightarrow \square$.

Warunek $WEYL = 0$, nałożony na osobliwość początkową, jest - zdaniem Penrose'a - tym poszukiwanym więzem, który sprawił, że w naszym świecie - gdy patrzymy wstecz w czasie entropia maleje; czyli więzem, dzięki któremu obowiązuje druga zasada termodynamiki, a strzałka czasu pokazuje z przeszłości w przyszłość, a nie odwrotnie.

To właśnie ten szczególny warunek ($WEYL = 0$) przyciągnął uwagę Stwórcy, gdy miał on zdecydować, który z możliwych modeli „skierować do realizacji”.

Przerzucanie odpowiedzialności za wybór modelu, spełniającego odpowiedni warunek, na decyzję Stwórcy byłoby jednak wymigiwaniem się od obowiązku uczonego. Z tego też powodu należy postawić pytanie: czy istnieje Jakieś prawo przyrody, które by wyjaśniało, dlaczego w osobliwości początkowej $WEYL = 0$? Kwantowa teoria grawitacji Chcąc doprowadzić do zespolenia metod ogólnej teorii względności i mechaniki kwantowej, możemy wybrać dwie drogi: albo starać się przystosować formalizm teorii względności do mechaniki kwantowej - i to jest strategia konwencjonalna, ogromna większość dzisiejszych prób wybiera tę drogę (w szczególności półklasyczne metody Hawkinga należą do tej kategorii); albo odwrotnie - poszukiwać takich ulepszeń metod kwantowych, którym uległaby grawitacja (oczywiście, możliwe są strategie polegające na łączeniu obydwu dróg). Penrose zdecydowanie opowiada się za strategią niekonwencjonalną. Jego zdaniem nie wystarczy poszukiwać takiej interpretacji mechaniki kwantowej, która uporałaby się z wszystkimi jej własnymi paradoksami. Trzeba szukać nowej, uogólnionej teorii kwantów, która w ogóle nie sprawiałaby trudności interpretacyjnych.

Charakterystyczną cechą równań ogólnej teorii względności jest ich silna nieliniowość, czyli ta cecha, dzięki której suma dwu rozwiązań układu równań nie jest ich nowym rozwiązaniem.

Nieliniowość decyduje o wielkim bogactwie możliwości kryjących się w równaniach Einsteina. Mechanika kwantowa natomiast jest teorią liniową. Dzięki temu dopuszcza ona bardzo sprawne metody matematyczne, ale - zdaniem Penrose'a - właśnie ta okoliczność może wykluczać sytuacje, których domagałoby się kwantowanie pola grawitacyjnego. Co więcej, Penrose przypuszcza, że w obecnej mechanice kwantowej istnieją pewne poszlaki,

wskazujące na nieliniowe zachowanie się obiektów kwantowych - jakby wierzchołki góry lodowej, które zwiastują ukrywającą się pod powierzchnią nieliniową rzeczywistość. Przykład tego Penrose widzi w zjawisku, zwanym redukcją funkcji falowej.

Układy kwantowe ewoluują w czasie w ten sposób, że prawdopodobieństwa ich zajścia są ściśle zdeterminowane (opisuje je równanie Schrodingera). W chwili, w której pomiar zostaje wykonany, w ewolucji pojawia się jednak ostra nieciągłość, determinizm zostaje złamany, a spośród wielu możliwości przewidywanych przez teorię zostaje zrealizowana tylko jedna. Która? Można to określić jedynie doświadczalnie. Istnieje zatem pewnego rodzaju niezgodność pomiędzy deterministycznym charakterem ewolucji układu kwantowego a procesem pomiaru.

Wygląda to tak, jakby proces pomiarowy sam decydował o wyniku pomiaru. Penrose sądzi, że w przyszłej mechanice kwantowej zarówno ewolucja, jak i akt pomiaru okażą się przejawami Jednego procesu o całkiem nowym charakterze. Metody teorii względności sugerują, że będzie to proces nieliniowy.

Penrose wierzy, że przyszła, nieliniowa teoria kwantów dostarczy metod, za pomocą których „w naturalny sposób” skwantuje się pole grawitacyjne i - po ich zastosowaniu do Wszechświata jako całości - zbuduje się kosmologię kwantową. Wówczas $WEYL = 0$, dla początkowej osobliwości, pojawi się jako naturalna konsekwencja kwantowej teorii pola grawitacyjnego. Następstwem tego będzie mała entropia na początku i duża entropia „na końcu świata”, związana z typową osobliwością krzywizny, w której $WEYL \rightarrow \square$. Innymi słowy, strzałka czasu będzie od samego początku wbudowana w nieliniową teorię kwantową (obejmującą również kwantowanie pola grawitacyjnego). Chociaż druga zasada termodynamiki zdaje się wywodzić ze statystycznego charakteru zjawisk cieplnych, w istocie jej źródło znajduje się w niezwykle precyzyjnej strukturze początkowej osobliwości, wymuszonej na Wszechświecie przez fundamentalną teorię kwantową.

Pod prąd Przemyslenia Penrose'a z konieczności przedstawiłem w znacznym uproszczeniu. Naprawdę są one o wiele bogatsze, nie poprzestają na ogólnych stwierdzeniach, lecz schodzą do konkretów i przewidywań. Dzięki temu są one jeszcze bardziej dyskusyjne, niż mogłoby się to wydawać na podstawie szkicowego, bądź co bądź, przedstawienia. Penrose nie ukrywa, że jego poglądy w wielu punktach różnią się od ogólnie uznawanych, że nie są - jak mówi - „powszechną mądrością”. Warto tę Jego przestrożę mieć na uwadze. W przeciwieństwie do modelu Hawkinga (i prac wielu innych autorów, które, choć półklasyczne, to jednak „pracują” - można na ich podstawie przeprowadzać rachunki i poszukiwać obserwowalnych efektów) Penrose nie zaproponował żadnego nawet

tymczasowego modelu lecz bardzo zręcznie wskazał rozmaite trudności standardowej teorii i potraktował je jako poszlaki, wskazujące kierunek, w którym należy dążyć. W tej sztuce okazał się mistrzem. Można przypuszczać, że wiele jego przepowiedni się spełni. Choć przepowiednie w fizyce mają to do siebie, że ich spełnienie zaskakuje nawet najśmielszych proroków.

Wprawdzie Penrose dotychczas nie stworzył poszukiwanej przez siebie (i przez wielu innych) Wielkiej Teorii, ale współczesną fizyka relatywistyczna zawdzięcza mu tyle nowych metod matematycznych, tyle konstrukcji, bez których nie można by się już dziś obejść, i tyle odkrywczych prac w rozmaitych dziedzinach, że nie ulega żadnej wątpliwości, iż historia nauki zaliczy Rogera Penrose'a do bardzo wybranego grona najlepszych relatywistów naszych czasów.

Oczywiście, Penrose nie musi mleć racji we wszystkim, ale warto dobrze się zastanowić, zanim się z nim nie zgodzimy.

ROZDZIAŁ 11

NIEPRZEMIENNY WSZECHŚWIAT

Gdzie szukać?

Człowiek podjął wyzwanie rzucone mu przez Wszechświat. Postanowił zrozumieć jego strukturę i sposób funkcjonowania do końca. Tak, by nic Już nie pozostało do zrozumienia. Czy da się to osiągnąć? Czy nie są to ambicje na miarę wieży Babel, która miała sięgnąć nieba? Dotychczasowe sukcesy są oszałamiające. Rozumiemy już strukturę kosmosu w wielkiej skali, rozumiemy strukturę atomu i strukturę cząstek subatomowych. Czy zdołamy przeniknąć do poziomu fundamentalnego, na którym grawitacja łączy się z kwantami? W poprzednich rozdziałach przedstawiłem wiele dróg, które - w przekonaniu ich twórców - mają do tego doprowadzić. Wprawdzie „po drodze” osiągnięto wiele: spenetrowano tereny przyległe, rozbudowano i wysubtelniono metody matematyczne, wyostrzono znane techniki obliczeniowe, stworzono kilka zupełnie nowych teorii, ale zasadniczy cel - poznanie ostatecznego - pozostaje odległy. Co jakiś czas wydaje się, że jest on w zasięgu ręki, za najbliższym zakrętem drogi, lecz gdy się tam zbliżymy, znowu się oddala i znowu kusi nas nowymi pomysłami. Wszystko to sprawia, że względy estetyczne i osobiste preferencje odgrywają w tej dziedzinie znacznie większą rolę niż w innych działach fizyki.

Przy końcu tej książki winien jestem Czytelnikowi spojrzenie z bardziej osobistej perspektywy na dotychczasowy wachlarz poglądów, ujawnienie własnego punktu widzenia i - być może - zaproponowanie jakiegoś nowego wariantu drogi.

Przed wszystkim ocena dotychczasowych osiągnięć. Myślę, że mimo wszystko są

znaczne. Odnoszę wrażenie, że jesteśmy na dobrym tropie, że nasze obecne modele mniej więcej tak się mają do poszukiwanej teorii, jak model atomu zaproponowany przez Bohra w drugiej dekadzie XX wieku miał się do pełnej teorii kwantów Schrodingera, Heisenberga i Diraca. To już bardzo dużo. To zaczyna działać, chociaż zapewne potrzeba jeszcze kilku radykalnych uogólnień, ażeby nasze fragmentaryczne modele ułożyły się w oryginalną całość.

Próbowano już wielu nowych matematycznych inwestycji. Niektóre daleko odchodziły od intuicji ukształtowanych dotychczasowymi sukcesami fizyki, ale wszystkie one były, w jakimś sensie, „dalszym ciągiem” tego, co już się zdarzyło.

I nadal postęp jest tylko fragmentaryczny. Rodzi się więc podejrzenie, że potrzebujemy jakiejś naprawdę radykalnie nowej matematyki. Czy nie jest zarozumiałą naiwnością sądzić, że świat w swoich najgłębszych warstwach został skrojony na miarę naszych umysłowych przyzwyczajień? Ale ta radykalnie nowa matematyka nie może przekreślać całej dotychczasowej fizyki. I mechanika kwantowa, i ogólna teoria względności są bardzo dobrze potwierdzonymi eksperymentalnie teoriami; teoria, której poszukujemy, a która ma być zbudowana dzięki radykalnie nowej matematyce, nie może więc przekreślać tych osiągnięć; musi wchłaniać je jako swoje graniczne przypadki. Wynika stąd, że radykalnie nowa matematyka powinna być radykalnym uogólnieniem matematyki dotychczas stosowanej w fizyce. Czy coś takiego pojawiło się na horyzoncie? Oczywiście, istnieje bardzo wiele nowych matematycznych koncepcji i ciągle rodzą się dalsze, ale moją uwagę od jakiegoś czasu przyciąga jedna z nich - geometria nieprzemieniana (niekomutatywna).

Nieprzemienność i jej następstwa

Co to znaczy „nieprzemieniana”? Nieprzemienność jest bardzo prostą własnością działań matematycznych. Na przykład mnożenie jest działaniem przemiennym, ponieważ $2 \cdot 3$ to tyle samo co $3 \cdot 2$ i dotyczy to wszystkich innych liczb rzeczywistych.

Ale istnieją w matematyce obiekty (choćby macierze), które tej własności nie posiadają. Mówimy wówczas, że mnożą się one nieprzemienne lub że mnożenie ich przez siebie jest nieprzemienne. Jest to więc bardzo prosta własność, ale ma ona dla wielu działów matematyki (a także fizyki, w której te działy matematyki są wykorzystywane) bardzo daleko idące konsekwencje. Dotyczy to również geometrii.

Wszyscy wiemy - i uważamy to za coś bardzo naturalnego - że przestrzeń „składa się” z punktów. Stosunkowo niedawno matematycy zrozumieli, że ten „oczywisty” fakt jest następstwem tego, iż funkcje gładkie na danej przestrzeni mnożą się w sposób przemienny. Związek funkcji z punktami, gdy się nad nim zastanowić, okazuje się dosyć oczywisty: wszystkie funkcje, które równają się zeru w danym punkcie, jednoznacznie ten punkt

określają. Zamiast punktami możemy więc operować gładkimi funkcjami, które w tym punkcie się zerują.

Intuicje są tu jasne. Wyraźmy je teraz w nieco bardziej matematycznym języku. Gładkie funkcje zdefiniowane na przestrzeni można mnożyć przez siebie (przemienne) i mnożyć je przez liczby rzeczywiste lub zespolone. Działania te mają pewne dobrze znane własności. Chcąc to wszystko określić jednym słowem, mówimy, że zbiór funkcji gładkich na danej przestrzeni jest algebrą. Istnieją także inne algebry, czyli zbiory obiektów obdarzonych analogicznymi własnościami. Podzbiór tych funkcji gładkich, które zerują się w danym punkcie przestrzeni, w języku algebraicznym nazywa się maksymalnym ideałem danej algebry. Maksymalne ideały są więc algebraicznymi odpowiednikami geometrycznych punktów.

Widzimy zatem, że istnieje pewna odpowiedniość między geometrią i algebrą. Te same prawidłowości można wyrażać bądź geometrycznie (w języku punktów), bądź algebraicznie (w języku funkcji). Jest to niejako dalszy ciąg tej samej prawidłowości, którą odkrył Kartezjusz, tworząc geometrię analityczną: każdą krzywą geometryczną można wyrazić w postaci równania algebraicznego. Do tej właśnie prawidłowości odwołują się podstawowe idee geometrii nieprzemiennej. Wybierzmy jakąkolwiek algebrę i zinterpretujmy ją geometrycznie - jako opisującą pewną przestrzeń. Jeżeli będzie to algebra funkcji gładkich, otrzymamy zwykłą przestrzeń, znaną z geometrii. Ale możemy w zasadzie wybrać jakąkolwiek algebrę.

Naprawdę ciekawe rzeczy zaczynają się dziać wówczas, gdy będzie to algebra nieprzemiennej. Algebra taka - z definicji - ma wszystkie własności algebry przemiennej, z wyjątkiem jednej: mnożenie w tej algebrze nie jest przemienne, czyli wynik mnożenia dwu elementów takiej algebry zależy od porządku, w jakim wykonujemy to działanie. Innymi słowy, jeżeli a i b są elementami algebry nieprzemiennej, to $a \cdot b$ nie równa się $b \cdot a$.

Jakie są konsekwencje tego zabiegu? Drastyczne. Algebry nieprzemienne na ogół nie mają ideałów maksymalnych, a więc czegoś, co odpowiadałoby punktom. Nieco rzecz upraszczając, można powiedzieć, że jeżeli mamy do czynienia ze słabą nieprzemiennością - różnica między $a \cdot b$ i $b \cdot a$ jest mała - punkty się rozmywają. Jeśli mamy do czynienia z silną nieprzemiennością - jeżeli różnica między $a \cdot b$ i $b \cdot a$ jest duża - punkty w ogóle znikają. W takiej sytuacji jakiegokolwiek pojęcia związane z umiejscowieniem tracą sens. Tego rodzaju nieprzemienność jest geometrią całkowicie globalną.

Dla fizyki następstwa przejścia od przemienności do nieprzemienności są dramatyczne. Gdybyśmy użyli geometrii nieprzemiennej do modelowania fizycznej

czasoprzestrzeni, będzie to „czasoprzestrzeń” (cudzysłów jest tu niezbędny!) bez zwykłego pojęcia czasu i bez zwykłego pojęcia przestrzeni.

Czas bowiem składa się z chwil, a przestrzeń - z punktów. Ponieważ są to pojęcia lokalne, w geometriach silnie nieprzemienne tracą one sens. Ale model bez czasu i przestrzeni może mieć znaczenie fizyczne, ponieważ jest on matematycznie całkiem poprawny. A jeżeli coś jest matematycznie poprawne, to zapewne prędzej czy później zostanie wykorzystane przez Jakiegoś pomysłowego fizyka.

W istocie fizycy już znacznie wcześniej wykorzystywali ideę nieprzemienności. I to z wielkim sukcesem. Można śmiało powiedzieć, że niemal wszystkie zaskakujące cechy mechaniki kwantowej wywodzą się z nieprzemienności ukrytej w jej matematycznym formalizmie. Na przykład słynne relacje Heisenberga, które mówią, że nie można zmierzyć natychmiast po sobie z dowolną dokładnością położenia oraz pędu cząstki elementarnej, są prostym następstwem tego, że matematyczne wyrażenia odpowiadające położeniu i pędowi mnożą się w sposób nieprzemienny. Miarą tej nieprzemienności jest stała Plancka. Ponieważ jest ona mała w porównaniu z odpowiednimi wielkościami makroskopowymi, położenie i pęd nie tracą sensu, lecz tylko rozmywają się. Czy nie jest to wskazówką, że na jeszcze głębszym poziomie możemy mieć do czynienia z jeszcze silniejszą nieprzemiennością? Nieprzemienne modele Matematykiem, który najbardziej przyczynił się do przekształcenia abstrakcyjnej algebry w geometrię nadającą się do zastosowania w fizyce, jest Alain Connes. Napisał on obszerną książkę *Noncommutative Geometry* [Geometria nieprzemienna, Nowy Jork 1994], trudną do czytania nawet dla matematyków, będącą jednak do dziś kopalnią informacji i pomysłów. Prace Connesa zapoczątkowały nowy program badawczy, w który zaangażowanych jest wielu ludzi, a który polega na stosowaniu geometrii nieprzemiennej do rozmaitych działów fizyki, zwłaszcza do teorii oddziaływań fundamentalnych. Osiągnięto już na tej drodze wiele interesujących wyników, ale ciągle niezrealizowanym jeszcze celem jest stworzenie nieprzemiennej kwantowej teorii grawitacji. Pewnym etapem na tej drodze byłoby najpierw sformułowanie nieprzemiennej wersji ogólnej teorii względności, a dopiero potem podjęcie próby jej skwantowania. I tu również zaproponowano kilka podejść, stworzono już liczne modele i udowodniono interesujące prawidłowości.

Uczonymi, którzy podjęli ten kierunek badań, są m.in.: sam Alain Connes, John Madore, A. H. Chamseddine, G. Felder i J. Fröhlich. Dużym osiągnięciem było skonstruowanie przez Connesa i J. Lotta Modelu Standardowego cząstek elementarnych opartego na geometrii nieprzemiennej. Wyjaśnijmy pokrótce, o co chodzi.

Od jakiegoś czasu w fizyce cząstek elementarnych funkcjonuje i odnosi wielkie

sukcesy Model Standardowy. Sukcesy polegają na tym, że przewidywania, wynikające z modelu, z ogromną dokładnością zgadzają się ze znanymi i wciąż nowo odkrywanymi faktami doświadczalnymi fizyki cząstek elementarnych i oddziaływań pomiędzy nimi. Model ten jest podstawą pracy wszystkich uczonych zajmujących się fizyką wysokich energii. Niestety, model ten jest nieelegancki. Stanowi zlepek kilku modeli, a nie jednolitą strukturę matematyczną. Właściwie w ostatnim zdaniu należałoby użyć czasu przeszłego, ponieważ w 1990 roku Connes i Lott pokazali, że taka Jednolita struktura matematyczna istnieje. Jeżeli bowiem przyjąć, że czasoprzestrzeń, rozważana w odpowiednio małej skali, podlega geometrii nieprzemiennej pewnego konkretnego typu, to Model Standardowy cząstek elementarnych otrzymuje się jako logiczną konsekwencję tej nieprzemiennej struktury. Ażeby fizyków ostatecznie przekonać, że model Connesa-Lotta jest istotnie lepszy od modelu dotychczasowego, trzeba by wykazać, że przewiduje on fakty empiryczne, które nie wynikają z dotychczasowego modelu. Tego jednak dotychczas nie udało się osiągnąć.

We wstępie do tego rozdziału obiecałem Czytelnikowi przedstawić problem kwantowania grawitacji bardziej z własnej perspektywy. Winienem teraz wywiązać się z tej obietnicy. Otóż w cyklu prac, wraz z moimi współpracownikami, Wiesławom Sasinem, Zdzisławem Odrzygóździem (obydwaj z Instytutu Matematyki Politechniki Warszawskiej) i Dominikiem Lambertem (z Uniwersytetu w Namur, Belgia), zaproponowaliśmy pewien nieprzemienny model, ukazujący nową drogę ku kwantowej teorii grawitacji. Nie Jest to jeszcze pełna teoria kwantowej grawitacji, ponieważ nasz pomysł opiera się na zbyt wielu upraszczających założeniach i, przede wszystkim, choć jest to pomysł unifikacji ogólnej teorii względności oraz mechaniki kwantowej, nie ma on charakteru kwantowej teorii pola, jakim powinna się odznaczać pełna kwantowa teoria pola grawitacyjnego.

Niemniej model może się poszczycić znacznymi sukcesami w wyjaśnianiu niewytłumaczonych dotychczas zagadnień mechaniki kwantowej (takich jak doświadczenie Einsteina, Podolsky'ego i Rosena oraz kolaps funkcji falowej), przejrzystością pojęciową i znaczną matematyczną elegancją. Ponieważ modelowi temu poświęciłem oddzielną książkę, czuję się obecnie zwolniony z omawiania jego szczegółów. W dalszym ciągu tego rozdziału przedstawię tylko pokrótce niektóre Jego własności i perspektywy, jakie otwiera.

Bezczasowa fizyka

Podstawową matematyczną strukturą naszego modelu jest pewna nieprzemienna algebra. Nazwijmy ją algebrą A . Geometria zbudowana w oparciu o tę algebrę łączy pewne cechy ogólnej teorii względności z pewnymi cechami mechaniki kwantowej. Ponieważ jest to geometria nieprzemienna, nie dopuszcza ona pojęć czysto lokalnych (algebra A nie ma

ideałów maksymalnych). A zatem nie istnieją w niej punkty i czas, składający się z chwil. Algebra A ma dwa naturalne przejścia: jedno prowadzi od naszego modelu do zwykłej ogólnej teorii względności, a drugie od naszego modelu do zwykłej mechaniki kwantowej. Zakładamy, że w erze Plancka obowiązywał nasz całkowicie globalny, beczasowy model, natomiast próg Plancka polegał na „złamaniu symetrii modelu” i wyłonieniu z niego, w dalszym ciągu już niezależnych od siebie, ogólnej teorii względności i mechaniki kwantowej.

Najbardziej prowokacyjną cechą naszego modelu jest jego beczasowy charakter. Jak widzieliśmy w poprzednich rozdziałach, już od dawna pojawiały się sygnały, że na poziomie fundamentalnym może nie być czasu i przestrzeni w ich zwykłym sensie. Jednakże w naszym modelu aczasowość i aprzestrzenność są radykalne i konsekwentne. Cechy te nie zostały wprowadzone za pomocą jakichś dodatkowych założeń, lecz wynikają z natury nieprzemiennej geometrii, która stanowi istotną matematyczną strukturę modelu.

Czy jest Jednak do pomyślenia fizyka bez czasu? Przecież istotny aspekt fizyki stanowi działanie się, dynamika. To prawda, ale okazuje się, że beczasowa mechanika jest możliwa.

Przyjrzyjmy się temu bliżej.

Zwykłą dynamikę w fizyce opisujemy za pomocą ruchu lokalnego, czyli zmiany miejsca, pod działaniem sił. Do modelowania takiej lokalnej dynamiki używamy pojęcia wektora. Przy użyciu wektora przedstawiamy zarówno wielkość siły, jak i wielkość przesunięcia powodowanego przez tę siłę. W geometrii nieprzemiennej nie mamy do dyspozycji tego narzędzia.

Wektor jest tworem lokalnym, a więc w naszym modelu nie istnieje. Ale dynamikę możemy opisywać także globalnie, wykorzystując pole wektorowe. W zwyczajnej (przemiennej) geometrii mówimy o polu wektorowym, jeżeli w każdym punkcie pewnego obszaru przestrzeni (lub w całej przestrzeni) jest „zaczepiony” jakiś wektor. Co więcej, pole wektorowe może spełniać pewne równanie różniczkowe, modelujące dynamikę rozważanego układu (na przykład newtonowskie równanie ruchu). Rzecz jasna, w geometrii nieprzemiennej nie możemy sobie wyobrazić wektorów „zaczepionych” w różnych punktach przestrzeni, bo żadnych punktów nie ma i takie wyobrażenie wykorzystywałoby pojęcie lokalności. Okazuje się jednak, że geometria nieprzemieniana dopuszcza pewien odpowiednik (a właściwie: uogólnienie) pojęcia pola wektorowego, które nawet w zwykłej geometrii ma pewien aspekt globalny; jest mianowicie określone na dużym obszarze przestrzeni lub nawet na całej przestrzeni. I właśnie ten aspekt można uogólnić. Uogólnieniem tym jest pewna operacja wykonywana na algebrze A (nazywa się ona derywacją). Operacja ta, jako

odpowiednik pola wektorowego, może służyć do modelowania dynamiki.

Jest to oczywiście dynamika uogólniona w stosunku do zwykłej dynamiki (takiej. Jaka spotykamy na przykład w mechanice klasycznej), dynamika bez pojęcia czasu i lokalnej zmiany, niemniej dynamika autentyczna, która jako swój szczególny przypadek (gdy odpowiednio zawęzi się algebrę A) daje klasyczną, znaną nam ze zwykłej fizyki, dynamikę. Co więcej, w ten sposób uogólnioną dynamikę można opisać za pomocą eleganckiej struktury matematycznej, zwanej algebrą von Neumanna.

Jest to charakterystyczna cecha algebry A . Dzięki niej wiele pojęć, znanych ze świata przemiennej matematyki i jej zastosowań do fizyki, zostaje uogólnionych - niekiedy uogólnionych tak silnie, że na pierwszy rzut oka trudno rozpoznać w nich ich przemienne pierwowzory. Dopiero bliższe przyjrzenie się sytuacji ukazuje, że istnieje przejście od algebry A do pewnej jej podalgebry przemiennej, nazwijmy ją $Z(A)$. Po tej operacji uogólnione pojęcie przechodzi w swój przemienne pierwowzór. Do pojęć, które w geometrii nieprzemiennej ulegają tego typu silnym uogólnieniom, należy prawdopodobieństwo. I tu kolejna, miła niespodzianka. Okazuje się, że po takim uogólnieniu pojęciu prawdopodobieństwa odpowiada dokładnie ta sama struktura matematyczna, która odpowiada uogólnionej dynamice w naszym modelu, czyli algebra von Neumanna. Mamy więc następujący wynik; nieprzemienne dynamiki jest ze swej natury probabilistyczna. Albo jeszcze wyraźniej: uogólniona dynamika i uogólnione prawdopodobieństwo to, z matematycznego punktu widzenia, po prostu to samo.

Dlaczego ten wynik jest „miłą niespodzianką”? Ponieważ w mechanice kwantowej równanie opisujące dynamikę (ruch) cząstki, na przykład elektronu, jest równaniem probabilistycznym: nie determinuje ono kolejnych położenia elektronu, lecz jedynie prawdopodobieństwa jego znalezienia się w danej chwili w danym miejscu. I nikt nie wiedział, dlaczego tak jest.

Obecnie równanie Schrodingera można wyprowadzić z naszego modelu i ten związek dynamiki z prawdopodobieństwem dziedziczy ono z ery nieprzemiennej.

Przyczynowość

Zaproponowany przez nas model, w swoim obecnym stadium, jest jedynie modelem roboczym, w który należy jeszcze zainwestować wiele wysiłku i pomysłowości, by mógł on w pełni konkurować z innymi, bardziej dopracowanymi, propozycjami kwantowania grawitacji. Jednakże już na tym wstępnym etapie swojego rozwoju ma on pewną wartość, i to wartość - powiedziałbym - także filozoficzną. Ukazuje mianowicie, jak bardzo rzeczywistość fizyczna może różnić się od naszych potocznych intuicji. Co więcej, nawet gdyby model

ostatecznie okazał się fałszywy, to ponieważ Jest to model matematyczny, i tak dowodziłby niesprzeczności pojęć, które są weń wbudowane. Jak widzieliśmy, na tej zasadzie można twierdzić, że pojęcie bezczasowej dynamiki jest niesprzeczne. Należy to uznać za swoistą rehabilitację często wyśmiewanych poglądów niektórych filozofów, utrzymujących, iż możliwe jest istnienie „poza czasem”. Co więcej, istnienie poza czasem, wbrew krytykom tej koncepcji, wcale nie musiałyby być równoznaczne z całkowitym bezruchem i statycznością. Święty Augustyn, Boecjusz, a potem liczni ich następcy uważali, że wieczność nie jest istnieniem w „nieskończonym czasie”, lecz istnieniem poza czasem; dziś coraz bardziej zaczynamy podejrzewać, że po to, aby odnaleźć obszar istnienia bezczasowego, wcale nie musimy wychodzić poza świat; wystarczy spenetrować odpowiednio głęboką jego warstwę.

Innym, obok dynamiki, pojęciem „wrażliwym” na związek z czasem jest przyczynowość. Jest to kluczowe pojęcie filozoficzne, ale ma ono swój ważny odpowiednik w geometrycznej strukturze czasoprzestrzeni. Niektórzy filozofowie (na przykład David Hume) usiłowali zredukować pojęcie przyczynowości do następstwa czasowego. Według nich jeżeli mówimy, że A jest przyczyną B, to w istocie twierdzimy, iż zdarzenie B następuje po zdarzeniu A. W fizyce nie tyle chodzi o następstwo czasowe, co o możliwość połączenia A i B sygnałem fizycznym, którego prędkość nie jest większa od prędkości światła. Jeżeli taka możliwość zachodzi, to mówimy, że zdarzenie B leży w stożku świetlnym zdarzenia A. Struktura przyczynowa, czyli struktura takich stożków świetlnych w czasoprzestrzeni. Jest ściśle określoną strukturą matematyczną. Po przejściu do geometrii nieprzemiennej i ta struktura ulega uogólnieniu. Zostaje z niej usunięte wszystko, co wiąże się z lokalnością, ale pozostaje coś, co moglibyśmy nazwać istotą związku przyczynowego.

Przyczynowość nie działa pomiędzy zdarzeniami, ponieważ zdarzenia są lokalne (a więc w omawianym modelu nie istnieją), ale zachodzi ona może pomiędzy stanami rozważanego układu, stany układu bowiem są czymś globalnym. To cały układ może być w takim czy innym stanie. Wydaje się więc, że do istoty przyczynowości nie należy następstwo czasowe, lecz pewien dynamiczny związek pomiędzy stanami układu. Myślę, że jest to ważna lekcja dla filozofów.

Nieprzemienny wszechświat Jeżeli przejście od geometrii przemiennej do nieprzemiennej prowadzi do tak drastycznych zmian pojęciowych, to czy nie powinno ono zmienić naszych poglądów na strukturę Wszechświata? Innymi słowy, czy ma jakieś następstwa dla kosmologii? Odpowiedź na to pytanie jest pozytywna i znacznie mniej hipotetyczna niż cały nasz model nieprzemiennego zjednoczenia ogólnej teorii względności i mechaniki kwantowej. Odpowiedź ta bowiem wynika z pewnych ściśle udowodnionych

twierdzeń matematycznych. A sprawa jest niebagatelna, ponieważ dotyczy początku i końca Wszechświata.

W matematycznej strukturze modelu kosmologicznego początek i koniec Wszechświata pojawiają się jako osobliwość początkowa i osobliwość końcowa. Są to osobliwości w rozwiązaniach równań różniczkowych, służących do modelowania Wszechświata. Dlaczego „osobliwości”? Bo gdy zbliżamy się do takiej osobliwości, pewne wielkości fizyczne występujące w równaniu, na przykład gęstość materii, dążą do nieskończoności, a równanie, w którym występuje „coś nieskończonego”, po prostu traci sens.

Podjęto wiele prób uporania się z problemem osobliwości. Niejako po drodze osiągnięto wiele ciekawych wyników i częściowych rezultatów, ale zasadniczy problem pozostał.

Roger Penrose, Stephen Hawking i jeszcze kilku teoretyków udowodnili szereg twierdzeń, z których wynika, że jak długo pozostaniemy przy klasycznych metodach modelowania czasoprzestrzeni, najbardziej złośliwe osobliwości - jak te, które przedstawiają początek i koniec Wszechświata w standardowym modelu kosmologicznym - nie mogą zostać usunięte.

Czasoprzestrzenie z tak silnymi osobliwościami stanowią bardzo złośliwe obiekty badania.

I tu znowu pojawia się możliwość zastosowań geometrii nieprzemiennej. Warto bowiem zwrócić uwagę na fakt, że matematycy stworzyli geometrię nieprzemienią właśnie po to, by badać takie przestrzenie, które nie poddają się badaniu za pomocą dotychczasowych metod. Fakt ten stał się dla nas inspiracją, by zmierzyć się ze złośliwymi osobliwościami, używając metod geometrii nieprzemiennej. Wkrótce okazało się, że był to dobry pomysł. Udało nam się udowodnić kilka twierdzeń, które ukazały problem złośliwych osobliwości w nowym świetle.

Oto najważniejsze wyniki.

Czasoprzestrzeń ze złośliwymi osobliwościami, na przykład standardowy model kosmologiczny z początkiem i końcem, można opisać jako przestrzeń nieprzemienią. Ponieważ jest to przestrzeń całkowicie nielokalna, nie składa się ona z punktów, ale sensownie można mówić o stanach takiego wszechświata. Okazuje się jednak, że nie ma żadnej różnicy między stanami osobliwymi i nieosobliwymi. Wszystkie stany wszechświata są równouprawnione i wszystkie jednakowo dobrze można badać metodami geometrii nieprzemiennej. Jeżeli więc przyjmiemy, że na poziomie fundamentalnym, poniżej progu

Plancka, rządzi geometria nieprzemienią, to na tym poziomie po prostu nie ma osobliwości.

Okazuje się jednak, że gdy dokonujemy przejścia od geometrii nieprzemiennej do geometrii przemiennej, czyli przekraczamy próg Plancka, złośliwe osobliwości się produkują. Jak ten fakt zinterpretować w odniesieniu do standardowego modelu kosmologicznego? Na poziomie fundamentalnym brak jest jakichkolwiek osobliwości, panuje beczasowa fizyka i nie ma sensu mówić ani o początku, ani o końcu Wszechświata. Dopiero wtedy, gdy makroskopowy obserwator, zanurzony w upływający strumień czasu, bada Wszechświat, dochodzi do wniosku, że - z jego czasowej perspektywy - miał on początek i będzie miał koniec.

Na ten wynik można spojrzeć także z nieco innego punktu widzenia. Znajdujemy się w świecie makroskopowym i chcemy dotrzeć do ery Plancka, w której panują nielokalność i beczasowość. Możemy iść w dwu kierunkach. Jeden kierunek to cofanie się w czasie; czyniąc to, osiągamy stany Wszechświata, w których gęstość materii jest coraz większa. Gdy gęstość wynosi 10^{93} g/cm³, osiągamy próg Plancka. Drugi kierunek to kierunek „w głąb”. Sięgamy do coraz mniejszych odległości przestrzennych. Docieramy do progu Plancka, gdy odległości są rzędu 10^{-33} cm. A zatem era Plancka była kiedyś dawno, „na początku”, ale jest też obecnie, tyle że „bardzo głęboko”.

Lecz era Plancka jest beczasowa i nielokalna, a więc te dwa kierunki eksploracji po prostu się utożsamiają. W tym sensie można powiedzieć, że „początek jest wszędzie”. Dotychczas w kwestii złośliwych osobliwości (interpretowanych jako początek lub koniec Wszechświata) panował pogląd „albo-albo”: albo kwantowa teoria grawitacji, gdy wreszcie zostanie odkryta, usunie osobliwości ze scenariusza kosmicznej historii, albo nie (za pierwszą możliwością opowiadała się zdecydowana większość teoretyków). Nieprzemienny scenariusz ukazał trzecią możliwość: pytanie o osobliwości na poziomie fundamentalnym nie ma sensu, lecz pytanie o osobliwości z punktu widzenia makroskopowego obserwatora, a więc z naszej perspektywy, ma sens: osobliwości pojawiają się jako produkt przejścia z poziomu fundamentalnego do „naszej fizyki”.

Jeszcze raz ukazują się tu pojęciowe możliwości tkwiące w nieprzemiennej matematyce. Nasz nieprzemienny model, unifikujący ogólną teorię względności z mechaniką kwantową, jest obecnie tylko modelem roboczym, ale ma on niewątpliwe walory dydaktyczne: przekonywająco uczy, że po przyszłej teorii kwantowej grawitacji powinniśmy się spodziewać głębokiej rewizji wielu podstawowych pojęć współczesnej fizyki.

ROZDZIAŁ 12

OD SUPERSTRUN DO GEOMETRII NAPRZEMIENNEJ

Zero-brany

Po przeczytaniu poprzedniego rozdziału nie można nie postawić pytania: jakie szanse ma nieprzemienny model unifikacji w konkurencji z takim potentatem, jak teoria superstrun, w dodatku jeszcze potężnie wsparta odkryciem M-teorii? Nad teorią superstrun i M-teorią pracują setki fizyków i matematyków w najlepszych ośrodkach świata. Wprawdzie do ostatecznego sukcesu jeszcze ciągle daleko, ale opracowano już liczne modele związane z tymi teoriami, wyjaśniono wiele niejasnych dotychczas zagadnień, ustalono szereg algorytmów obliczeniowych, które już sprawdziły się w działaniu, wykonano ogromną liczbę prac, uwieńczonych doktoratami i różnymi naukowymi wyróżnieniami. Geometria nieprzemienna ma po swojej stronie atut nowości, wyrafinowane pojęcia matematyczne, zadziwiające swoją ogólnością i stopniem abstrakcji, oraz grupę zdolnych matematyków, biegłych w dziedzinie, która jeszcze ciągle wykracza poza standardowe wykszolenie fizyków teoretyków. To ostatnie nie stanowi jednak większej przeszkody. Fizycy teoretycy bowiem odznaczają się pewną agresywnością w stosunku do nowych metod matematycznych. Jeśli metoda jest obiecująca, warto poświęcić nawet wiele czasu i wysiłku, by się jej nauczyć.

Teoretycy od superstrun i M-teorii Już wielokrotnie tego dowiedli, a obecnie coraz częściej swoją uwagę kierują w stronę geometrii nieprzemiennej. I mają po temu poważne powody.

Podstawowymi cegiełkami teorii superstrun i M-teorii są drgające i wibrujące jednowymiarowe struny i n-wymiarowe n-brany. Z nich konstruuje się teorie pól kwantowych i cząstek elementarnych. Zachowanie strun i n-bran podlega pięknej matematyce, ale z intuicyjnego punktu widzenia tworzy ono coś na kształt wrzącego kłębowiska. Matematyk, używając swojego technicznego żargonu, powie, że przestrzeń strun i n-bran odznacza się bogatą topologią. Ale Jakkolwiek „bogate” byłoby zachowanie strun i n-bran, zawsze „dzieje się” ono w czasoprzestrzeni. Z chwilą jednak, gdy chcemy za pomocą superstrun opisać pole grawitacyjne, pojawiają się komplikacje. Bo przecież, zgodnie z ogólną teorią względności, pole grawitacyjne to sama czasoprzestrzeń, a ściślej - jej zakrzywienie (czyli geometria). Jak to opisać w języku strun? Należy po prostu zidentyfikować czasoprzestrzeń z wielką liczbą strun wibrujących w pewien uporządkowany sposób (fizycy nazywają to koherentnym stanem strun). Ponieważ jednak teoria superstrun jest równocześnie teorią kwantową, na ten poglądowy obraz należy jeszcze nałożyć pewne rozmycie, charakterystyczne dla wszystkich procesów kwantowych. Wynika ono z tego, że opis kwantowy jest zawsze probabilistyczny.

Można więc sobie wyobrazić, że czasoprzestrzeń jest utkana z koherentnie, ale „probabilistycznie” wibrujących strun.

Dlaczego strun? Struna jest tworem jednowymiarowym.

Dlaczego właśnie wymiar 1 ma być uprzywilejowany? A nie na przykład 3, 7 lub 1285? W tradycyjnej fizyce uważano, że cząstki elementarne są zerowymiarowe i fizycy byli z tego raczej zadowoleni. Cząstki zerowymiarowe są po prostu „fizycznymi punktami”, a punkt z niczego się nie składa, jest naprawdę elementarny. Podobnie rozumują teoretycy od superstrun i n-bran. Gdyby udało się stworzyć zerobranę, czyli brane o wymiarze 0, byłby to obiekt naprawdę elementarny, - Ściśle rzecz biorąc, nie musimy za każdym razem, obok n-bran, wymieniać także strun; struny są po prostu jednobranami, czyli branami jednowymiarowymi.

I nasz instynkt poszukiwania „czegoś jeszcze bardziej podstawowego” zostałby zaspokojony. Zero-brany do swego istnienia nie wymagałyby ani czasu, ani przestrzeni. Z najnowszych prac Edwarda Wittena, Toma Banksa, Leonarda Susskinda i innych zaczyna się powoli wyłaniać prawdopodobny obraz Zero-brany: oglądana z daleka zero-brana wygląda jak cząstka punktowa, wzięta pod matematyczny mikroskop pozwala zajrzeć do rzeczywistości fizycznej, w której nie ma ani czasu, ani przestrzeni. W tym miejscu Czytelnik sam wpadnie na pomysł, że może to być rzeczywistość nieprzemienialna, opisana w poprzednim rozdziale. Na ostatnich stronach swojej pięknej i arcyciekawej książki o superstrunach Brian Greene pisze: [...] rozważania nad zero-branami otwierają niewielkie okno na niekonwencjonalną rzeczywistość. Badania zero-bran pozwalają zastąpić zwykłą geometrię geometrią niekomutatywną [tzn. nieprzemienialną], obszarem matematyki stworzonym w dużej mierze przez francuskiego matematyka Alaina Connesa. W strukturze tej tradycyjne pojęcia przestrzeni i odległości między punktami znikają, pozostawiając nas w zupełnie innym krajobrazie pojęciowym.² Spróbujmy ustalić jakieś bardziej konkretne pomosty pomiędzy teorią superstrun a tym „innym krajobrazem pojęciowym”.

Piana czasoprzestrzeni i jeszcze dalej

Czasoprzestrzeń fizyki klasycznej (a do niej należy teoria względności) jest gładka, to znaczy można na niej zdefiniować funkcje, które zachowują się w sposób poprawny, czyli w taki sposób, jaki lubią matematycy i fizycy. Innymi słowy, funkcje te można różniczkować i całkować, tak jak tego wymaga elementarny kurs analizy matematycznej i jak jest to potrzebne do uprawiania fizyki klasycznej. Technicznie mówi się, że czasoprzestrzeń jest gładką mnogością.

Różne wersje kwantowania grawitacji, którym przyglądaliśmy się w poprzednich

rozdziałach, naruszają tę gładką strukturę. Im dalej w głąb, tym bardziej struktura czasoprzestrzeni staje się pienista i postrzępiona. Wrzucmy garść proszku do prania do miednicy z ciepłą wodą i dobrze rozmieszajmy.

Utworzy się gęsta piana. Jeżeli patrzymy na nią z pewnej odległości lub przez lekko zmatowiałe okulary, powierzchnia piany wydaje nam się gładka. Ale jeżeli przyjrzymy się) dokładniej, na przykład przez szkło powiększające, wyraźnie dostrzeżemy nieciągłą, pienistą strukturę. Podobnie sprawa przedstawia się ze strukturą czasoprzestrzeni: dla niedokładnego oka fizyki makroskopowej jest gładka, ale odpowiednio czułym metodom fizyki kwantowej ujawnia swoją nieciągłą, wrzącą naturę. Matematyk znowu użyłby tu ulubionych przez siebie topologicznych środków opisu i powiedziałby, że na głębokim poziomie czasoprzestrzeń ma strukturę piany topologicznej. Funkcje zdefiniowane na takiej czasoprzestrzeni odzwierciedlają jej bogatą naturę. W ogóle jest tak, że zamiast posługiwać się daną przestrzenią (lub czasoprzestrzenią), możemy wykorzystywać odpowiadającą jej rodzinę funkcji. Z rozdziału 11 pamiętamy, że rodzina ta musi mieć pewne charakterystyczne własności, związane z mnożeniem i dodawaniem funkcji, i że gdy takie własności posiada, nazywamy ją algebrą. Opis w języku funkcji daje dokładnie to samo, co opis w języku przestrzeni, ale niekiedy - zwłaszcza gdy przestrzenie są bardzo „spienione” - jest znacznie wygodniejszy.

Geometria superstrun, a także n -bran, rozgrywa się w czasoprzestrzeni (choć wzbogaconej o kilka dodatkowych wymiarów; por. rozdział 8), ale jej topologia jest znacznie bogatsza niż w teoriach klasycznych. Mamy powody, by sądzić, że im dalej w głąb, tym bardziej topologia staje się pienista. Istnieją jednak twierdzenia matematyczne, które mówią, że jak długo akcja strun rozgrywa się w czasoprzestrzeni, tak długo ich geometrię (i ich topologię) daje się opisywać w języku pewnej Co dzieje się z funkcjami, gdy coraz bardziej naruszamy gładką strukturę czasoprzestrzeni: już nie tylko tworzymy z niej pianę, lecz strzępimy ją i kawałkujemy? Nadal możemy posługiwać się opisem funkcyjnym, ale musimy stosować bardziej wyrafinowane metody niż te, które zazwyczaj stosuje się w tradycyjnej geometrii różniczkowej.³ Gdy w swojej „niszczycielskiej” działalności postępujemy dalej i dalej, dochodzimy wreszcie do krańcowego przypadku, gdy algebra funkcji na takiej „patologicznej” przestrzeni składa się tylko z funkcji stałych. A funkcje stałe to takie funkcje, które w każdym punkcie danej przestrzeni (czy czasoprzestrzeni) mają tę samą stałą wartość (tzn. wszędzie są równe 1,0 albo 34 287). Innymi słowy, funkcje stałe nie odróżniają punktów. Dla tej algebry funkcji cała przestrzeń (czy czasoprzestrzeń) zlewa się do jednego punktu. Mamy więc prawdziwą zero-brane.

I tu właściwie pojawia się Alain Connes ze swoim pomysłem geometrii nieprzemiennej. Geometria ta została wynaleziona właśnie w tym celu, by za jej pomocą dało się badać przestrzenie, które dotychczas uważano za do tego stopnia patologiczne, że nie poddające się jakimukolwiek matematycznemu opisowi. Znana monografia Connesa (por. rozdział 11) pełna jest przykładów takich przestrzeni. Obecnie używając metod nieprzemiennych, możemy je nie tylko badać, ale również uzyskiwać interesujące wyniki. Connes jest rasowym matematykiem i oryginalną motywacją jego prac były nie tyle zastosowania w fizyce, ile raczej wyostanie czysto matematycznych metod.

Dopiero potem jeszcze raz potwierdziła się od dawna znana w nauce zasada, głosząca, że elegancka matematyka prędzej czy później znajdzie swe miejsce w fizyce.

Pamiętamy z poprzednich rozdziałów, jakie trudności łączyły się z próbami matematycznego opisu osobliwości. Przypomnijmy sobie na przykład zamknięty model Friedmana z jego dwiema osobliwościami: początkową i końcową (por. rozdział 3) i spróbujmy potraktować czasoprzestrzeń tego modelu wraz z jego osobliwościami jako jedną przestrzeń geometryczną. Wiemy już, jak to zrobić: trzeba znaleźć odpowiednią algebrę funkcji, w której byłaby zawarta cała informacja o tej przestrzeni.

Przy odrobinie pomysłowości algebrę taką można skonstruować i wówczas okazuje się, że składa się ona... tylko z funkcji stałych. Innymi słowy, cały Wszechświat, z jego historią, początkiem i końcem, redukuje się do punktu.

Problem ten rozwiązuje przejście od zwykłej geometrii do geometrii nieprzemiennej. Co z tego wynika? Jakie otrzymuje się rezultaty? - zostało to opisane w poprzednim rozdziale.

Próba scenariusza

Jaki zatem obraz wyłania się z tych rozważań? Najpierw jest reżim nieprzemienny. Najpierw - to znaczy przed progiem Plancka. Nie istnieją czas i przestrzeń, a więc nie ma również sensu pytać, co się działo przedtem lub czy był jakiś początek.

Obowiązuje fizyka przypuszczalnie podobna do tej, która została opisana w rozdziale 11; przypuszczalnie - ponieważ model tam przedstawiony jest jedynie modelem roboczym, na pewno zbyt uproszczonym. W reżimie nieprzemiennym panuje niemal doskonała jedność. Uogólniona dynamika, uogólniona topologia i uogólnione prawdopodobieństwo są modelowane przez tę samą strukturę matematyczną - przez tę samą algebrę nieprzemienną, w której zawarte są wszystkie informacje o nieprzemiennej epoce. Rzeczą godną uwagi jest fakt, że zarówno dynamika, jak i topologia są wówczas całkowicie probabilistyczne, ale uogólnione prawdopodobieństwo nie ma w sobie nic, co mogłoby się wiązać z niepewnością oczekiwania. Nie ma bowiem czasu wraz z jego przemijaniem i zwykłym rozumieniem

przyszłości. Uogólnione prawdopodobieństwo można sobie wyobrazić jako ogromne pole potencjalności, ale potencjalności, których urzeczywistnienie jest już jakoś obecne.

Chcąc intuicyjnie uchwycić to, co działo się w nieprzemiennym reżimie, należy również poćwiczyć wyobraźnię w pozbywaniu się obrazów przestrzennych. Mówiliśmy o planie topologicznej. Czy w nieprzemiennym reżimie też występuje piana, tylko jeszcze większa, jeszcze bardziej kłębiasta, postrzępiona i pokawałkowana niż w epoce superstrun? Taki obraz zakłada pojęcie zwykłej czasoprzestrzeni, składającej się z punktów, a czegoś takiego nie ma w nieprzemiennym wszechświecie. W epoce tej wprowadziliśmy pojęcie punktu jest bezsensowne, ale ma sens pojęcie stanu (bo stan jest pojęciem globalnym). Co więcej, stany nieprzemiennego reżimu można precyzyjnie opisać w języku teorii algebr nieprzemiennych. Okazuje się, że stany te są drastycznie inne niż na przykład stany układów rozważanych w mechanice klasycznej. Z naszego punktu widzenia mamy pełne prawo powiedzieć, że są to stany osobliwe, ale dla geometrii nieprzemiennej są one całkowicie normalne; dla niej samo rozróżnienie na stany osobliwe i nieosobliwe jest pozbawione sensu. Przestrzeń nieprzemienną nie jest więc postrzępiona czy nierówna; jest totalnie odmienna od zwykłych przestrzeni i tylko w tym sensie możemy ją nazwać uogólnioną pianą topologiczną.

Warto również jeszcze raz uświadomić sobie, że erę Plancka należy umieszczać nie tylko w zamierchłej przeszłości Wszechświata, lecz również obecnie, na najbardziej fundamentalnym poziomie funkcjonowania praw fizyki (por. rozdział 11). W tym sensie era Plancka, będąc beczasową, istnieje zawsze. Ale my funkcjonujemy „zanurzeni w czasie i przestrzeni” i z naszej perspektywy, cofając się w czasie wstecz lub idąc do coraz głębszych warstw Wszechświata, zbliżamy się do progu Plancka, który - według naszej oceny - był końcem planckowskiej epoki.

Z matematycznego punktu widzenia przejście od ery nieprzemiennej do przemiennej polega, jak już wiemy, na zacieśnieniu algebry, odpowiedzialnej za geometrię nieprzemienną, do pewnej podalgebry, zwanej jej centrum, która jest już przemienna. Istnieją poważne poszlaki, także natury matematycznej, że przejście to nie jest natychmiastowym skokiem, lecz dokonuje się mniej lub bardziej stopniowo. W trakcie tego przejścia wyłaniają się czas i przestrzeń. Nie są one natychmiast gładkie. Należy sądzić, że uogólniona piana topologiczna przechodzi najpierw przez okres zwykłej piany topologicznej; i to od plany coraz bardziej „pianistej” do coraz bardziej spokojnej. Również po zacieśnieniu algebry do jej centrum wyłania się pojęcie wymiaru i wcale nie musi to być wymiar $1+3$ (1 czasowy i 3 przestrzenne). Wszystko wskazuje na to, że właśnie w tym „okresie przejściowym” obowiązuje teoria superstrun, czy, ogólniej, M-teoria. Pozwijane struny i powyginane n-brany

byłyby więc etapem pośrednim pomiędzy reżimem nieprzemiennym a zwykłą, znaną nam z fizyki klasycznej, gładką geometrią czasoprzestrzeni. Trzeba wszakże podkreślić, iż są to ciągle jeszcze bardziej poparte pewnymi rozumowaniami przypuszczenia niż dobrze ustalone fakty matematyczne.

Paradoks horyzontu i inne trudności W standardowej kosmologii dość powszechnie przyjmuje się, że Wszechświat w swojej bardzo wczesnej historii przeszedł przez fazę gwałtownej ekspansji, zwanej fazą inflacyjną (por. rozdział 7). Wprawdzie do dziś nie ma dowodów obserwacyjnych na to, że faza taka istotnie miała miejsce w dziejach Wszechświata, ale wyjaśnia ona zbyt wiele trudności standardowej kosmologii, by można było z niej zbyt łatwo zrezygnować. Jedną z takich trudności jest paradoks horyzontu. Wynika on z nałożonego przez teorię ograniczenia, stwierdzającego, że żaden sygnał fizyczny nie może rozchodzić się z prędkością większą niż światło. Jeżeli weźmie się to pod uwagę, stosunkowo łatwo wykazać, że w odpowiednio dużym Wszechświecie muszą istnieć obszary, które nigdy nie mogły się ze sobą komunikować. Są one bowiem tak od siebie czasoprzestrzennie odległe, że nawet sygnał świetlny nie zdążyłby przebyć dzielącej je drogi w czasie krótszym lub równym aktualnemu wiekowi Wszechświata. A zatem obszary takie z fizycznego punktu widzenia są całkowicie rozłączone, nigdy nie mogły wymieniać ze sobą fizycznych sygnałów. Można wyliczyć, że obszarami takimi są na przykład dwie połacie nieba położone na przeciwległych krańcach sfery niebieskiej. A przecież już stosunkowo proste obserwacje astronomiczne przekonują, że obszary takie są w sensie statystycznym takie same. Zasada kosmologiczna stwierdza, że Wszechświat, średnio rzecz biorąc, wszędzie wygląda tak samo i zasadę tę dobrze potwierdzają obserwacje rozkładu galaktyk i ich gromad (jeżeli obserwować Wszechświat w odpowiednio dużej skali). Skąd więc rozłączone obszary wiedziały, jak się uśrednić, by wyglądać tak samo, jeżeli nie mogły wymienić pomiędzy sobą żadnego fizycznego sygnału? Paradoks wyostrza się jeszcze bardziej, jeżeli uświadomić sobie, że pod innym względem rozłączone obszary są takie same nie tylko w sensie statystycznym, lecz niemal identyczne, i to z niesłychanie wielką precyzją.

Kosmologia Wielkiego Wybuchu przewiduje, że bardzo młody Wszechświat (gdy jego wiek sięgał 100 tysięcy lat, licząc od początkowej osobliwości) był wypełniony gorącym promieniowaniem elektromagnetycznym. George Gamow i jego współpracownicy przewidzieli istnienie tego promieniowania już w 1948 roku, ale dopiero w roku 1964 Arno Penzias i Robert Wilson odkryli je podczas obserwacji radioastronomicznych.

Odkrycie to stało się przełomem w kosmologii. Dzięki niemu można było „zobaczyć”, jak wyglądał bardzo młody Wszechświat. Nic dziwnego, że amerykańska Agencja Badania

Przestrzeni Kosmicznej (NASA) nie oparła się pokusie (oraz namowom kosmologów) i wysłała satelitę specjalnie po to, by możliwie najdokładniej określić cechy promieniowania, nazwanego w międzyczasie promieniowaniem reliktowym (po Wielkim Wybuchu) lub kosmicznym promieniowaniem tła. Ta ostatnia nazwa pochodzi stąd, że promieniowanie to niezwykle jednostajnie wypełnia Wszechświat. Amerykański satelita o dźwięcznej nazwie COBE (Cosmic Background Explorer, czyli Kosmiczny badacz [promieniowania] tła) wykonał odpowiednie pomiary i pokazał, że obecna temperatura promieniowania tła wynosi $2,735 \pm 0,06$ K (czyli 2,735 stopnia w skali bezwzględnej (Kelvina) z błędem $\pm 0,06$ K). Kiedyś promieniowanie to było niezmiernie gorące, ale ostygło do tak niskiej temperatury wskutek rozszerzania się Wszechświata. Co więcej, temperatura promieniowania tła jest taka sama we wszystkich punktach nieba z dokładnością 0,00001. I tu Jest właśnie problem: w jaki sposób rozłączne obszary Wszechświata mogły uzgodnić temperaturę tła z taką dokładnością? Wobec tej zdumiewającej dokładności przypadek jest nie do przyjęcia. Pozostaje więc albo Jednakową temperaturę dla całego Wszechświata „włożyć ręcznie” do warunków początkowych równań kosmologicznych, albo wymyślić jakiś fizyczny mechanizm, który by rozciął ten węzeł. Mechanizm taki wymyślił Alan Guth. Jest nim faza inflacyjna w bardzo wczesnej historii Wszechświata. Istotnie, jeżeli kiedyś Wszechświat doznał bardzo gwałtownej ekspansji, to cały dziś obserwowany kosmos przed fazą inflacyjną był małą kroplą tego, co wówczas tworzyło Wszechświat. I dopiero inflacja do tego stopnia rozdeła tę kroplę, że po jej zakończeniu niektóre obszary Wszechświata stały się ze sobą rozłączne. W modelu Gutha rozdeście Wszechświata jest rzeczywiście gigantyczne: w ciągu 10^{-35} sekundy Wszechświat powiększył swoje rozmiary 10^{30} razy, a w niektórych późniejszych wersjach inflacyjnego modelu rozdeście jest jeszcze większe! Taka inflacja likwiduje całkowicie problem horyzontu.

Innym wielkim sukcesem satelity COBE było wykrycie małych „zmarszczek” na równomiernym tle kosmicznego promieniowania pierwotnego. Zmarszczki te są rzeczywiście znikome: jedna stutysięczna powyżej lub poniżej średniej temperatury promieniowania. I tak właśnie powinno być. Gdyby pole promieniowania okazało się idealnie gładkie, nie mogłyby powstać galaktyki i gromady galaktyk, a w konsekwencji i my nie pojawilibyśmy się we Wszechświecie. Co więcej, drobne zmarszczki na polu promieniowania są śladem procesów, Jakich odbywały się w bardzo młodym kosmosie. Dokładniejsze zmierzenie i wyznaczenie rozmieszczenia zmarszczek w niedalekiej przyszłości (już są planowane dwie następne misje satelitarne) przyniesie nam wiele informacji o podstawowym znaczeniu kosmologicznym i, być może, pozwoli zweryfikować model inflacyjny.

Ponieważ jednak model inflacyjny do dziś nie został bezpośrednio potwierdzony empirycznie, a głównym jego atutem jest usuwanie paradoksów, w jakie wikła się standardowa kosmologia, warto rozejrzeć się za innym ich wytłumaczeniem.

Dobrze by również było, gdyby te wyjaśnienia wynikały z jakiejś ogólniejszej teorii, a nie pojawiały się tylko po to, by uporać się z jakąś konkretną trudnością. I tu mamy dobrą wiadomość. Okazuje się, że kosmologia nieprzemienna w sposób bardzo naturalny likwiduje paradoks horyzontu bez rozdymania Wszechświata. Przyjrzyjmy się temu nieco dokładniej.

„Na początku” mamy reżim nieprzemienny. Wszystko Jest globalne; jakiegokolwiek pojęcia związane z umiejscowieniem - czy to w czasie, czy w przestrzeni - są pozbawione sensu. Fizyczne cechy mogą się odnosić tylko do Wszechświata jako całości, a nie do jego części, gdyż pojęcie części, jako lokalne, w reżimie nieprzemiennym nie funkcjonuje. I oto następuje proces przechodzenia przez próg Plancka do fazy przemiennej.

W trakcie tego procesu pojęcia lokalne stają się sensowne. Na pewnym etapie możemy już mówić o częściach Wszechświata.

Nabiera również znaczenia standardowa fizyka wraz ze swoim fundamentalnym ograniczeniem na prędkość przenoszenia fizycznych sygnałów. Niektóre części Wszechświata stają się względem siebie rozłączne. Ale wszystkie one, nawet jeśli są rozłączone, dziedziczą wszelkie fizyczne cechy po erze nieprzemiennej, w której wszystkie one były globalne, czyli odnosiły się do całości. A zatem były tylko jedne. Nic zatem dziwnego, że po przejściu przez próg Plancka nawet bardzo odległe od siebie części kosmosu są prawie identyczne. Są identyczne, bo odziedziczyły te same cechy po erze nieprzemiennej; ale są prawie identyczne, ponieważ początkowo małe fluktuacje kwantowe zostały potem wzmocnione na skutek rozszerzania się Wszechświata. I nie musiało to być rozszerzanie typu inflacyjnego. Kosmologia nieprzemienna nie wyklucza modelu inflacyjnego, ale do zlikwidowania paradoksu horyzontu go nie wymaga.

Zwolennik wszechświata inflacyjnego mógłby tu zaproponować: „Dobrze. Zgoda co do problemu horyzontu. Ale są również inne problemy, z którymi nie radzi sobie kosmologia standardowa, a które wyjaśnia przyjęcie fazy inflacyjnej. Na przykład problem monopoli czy problem płaskości”.

Owszem, takie problemy istnieją. Problem monopoli polega na tym, że niektóre teorie wielkiej unifikacji (same dosyć spekulatywne) przewidują, iż w obecnym Wszechświecie powinna istnieć duża liczba cząstek, zwanych monopolami magnetycznymi. Tymczasem cząstek takich nie obserwujemy. Gdzie się więc podziały? Problem płaskości dotyczy geometrii przestrzeni. Przestrzeń może mleć dodatnią, ujemną lub zerową krzywizną (por.

rozdział 3). Przestrzeni zakrzywionych jest wiele, ponieważ przestrzeń może być zakrzywiona bardziej lub mniej, ale przestrzeń płaska (czyli z zerową krzywizną) - tylko jedna.

Ażeby Wszechświat miał zakrzywioną przestrzeń, jego warunki początkowe mogą być niemal dowolne; ażeby jednak posiadał przestrzeń płaską, Jego warunki początkowe muszą być niezwykle precyzyjnie dobrane. Tymczasem obserwacje pokazują, że przestrzeń Wszechświata, w którym żyjemy, jeśli nawet nie jest płaska, to jej krzywizna tylko bardzo nieznacznie różni się od zera. Co zatem sprawiło, że warunki początkowe zostały tak dokładnie dobrane? Model inflacyjny wszystkie te trudności tłumaczy za jednym zamachem. Za wszystko jest odpowiedzialne rozdęcie Wszechświata. Kiedyś monopole magnetycznych było bardzo dużo, ale inflacja tak ich populację rozrzedziła, że dzisiaj w naszym kosmicznym otoczeniu praktycznie nie występują. To samo rozszerzanie wyjaśnia problem płaskości. Wszechświat przed inflacją mógł mieć dowolną krzywiznę, potem inflacja rozdeła kosmos do ogromnych rozmiarów - do tego stopnia, że obecnie obserwowany przez nas Wszechświat jest tylko małym fragmentem całości. A mały fragment dowolnej przestrzeni jest zawsze prawie płaski. Podobnie jak kula ziemską, która wydaje się nam płaska, choć ma zakrzywioną powierzchnię.

Widzimy więc, że model inflacyjny istotnie ma bardzo dużą moc wyjaśniającą, ale... sam również domaga się wyjaśnienia.

I to w podwójnym sensie. Po pierwsze, wolelibyśmy, gdyby wynikał on z jakiejś ogólniejszej teorii fizycznej lub z jakichś bardziej podstawowych zasad fizycznych, a nie był przyjmowany tylko po to, aby wyjaśniać pewne problemy. Po drugie, modele kosmologiczne z inflacją także wymagają specjalnych warunków początkowych. Gdybyśmy zupełnie przypadkowo (na przykład na drodze losowania) wybierali warunki początkowe dla równań kosmologicznych, prawdopodobieństwo tego, że trafilibyśmy na takie warunki, które prowadzą do inflacji, byłoby znikomo małe. Co więc warunki takie ustaliło? Model nieprzemienny stanowi propozycję fundamentalnej teorii. Wprawdzie Jest to na obecnym etapie badań propozycja hipotetyczna, ale obiecująca. Ukazuje ona - w dość ogólnych zarysach, to prawda - jak mogła wyglądać fizyka w epoce, w której nie było ani czasu, ani przestrzeni, i w elegancki sposób tłumaczy, jak z nieprzemiennej fazy wynurzyła się fizyka wraz z jej równaniami obecnie rządzącymi Wszechświatem. To wówczas, w przejściu przez próg Plancka, ustaliły się warunki początkowe dla tych równań. Nie trzeba więc ich przyjmować ani dowolnie, ani drogą losowania. Ustala je fizyka ery nieprzemiennej i mechanizm przechodzenia przez próg Plancka. Wprawdzie są to dziś jeszcze czynniki zbyt

mało zbadane, byśmy potrafili zrekonstruować warunki początkowe dla naszego Wszechświata, ale możemy mieć nadzieję, że się to (wkrótce?) powiedzie. I wówczas zobaczymy, czy model nieprzemienny lepiej wyjaśnia kosmos i jego zagadki niż modele konkurencyjne. W grę zwaną nauką zawsze jest wkomponowany element ryzyka.

ZAKOŃCZENIE: W ERZE PLANCKA FIZYKA SPOTYKA SIĘ Z FILOZOFIĄ

Połączenie metod fizyki grawitacji z metodami fizyki kwantów jest niewątpliwie najważniejszym problemem i największym wyzwaniem współczesnej fizyki. W poprzednich rozdziałach dokonaliśmy przeglądu rozmaitych prób przeprowadzenia tej fundamentalnej unifikacji. Pomysłów jest wiele, metod matematycznych, niekiedy bardzo wyrafinowanych, ogromne bogactwo. Wszystkie one otwierają nowe możliwości pojęciowe i prześcigają się w oryginalności. Rodzi się jednak niepokojące pytanie: czy to jest Jeszcze fizyka? solidna, zakorzeniona w doświadczeniu nauka? Przecież żadna z tych prób nie może poszczycić się konkretnymi przewidywaniami empirycznymi, które w niezbyt odległej przyszłości miałyby szansę na porównanie z rzeczywiście przeprowadzonymi doświadczeniami. Owszem, wszystkie te próby w jakimś sensie powołują się na eksperymenty: albo tłumaczą już znane, ale jeszcze nie całkiem zrozumiane wyniki doświadczeń; albo przewidują pewne następstwa w późniejszych fazach rozwoju Wszechświata, z nadzieją, że może kiedyś astronomowie będą je mogli wykryć; albo przepowiadają nowe efekty, których wykrycie jednak wymaga tak wielkich energii, że pozostają one w sferze nierealistycznych marzeń. Czy to można nazywać fizyką? W połowie XX wieku kosmologia znajdowała się w podobnej sytuacji. Poza przesunięciem ku czerwieni w widmach galaktyk, którego interpretacja pozostawała wysoce niepewna, nie istniały praktycznie żadne inne efekty obserwacyjne i nie było na nie wielkich nadziei. Niektórzy teoretycy mówili wówczas, że uprawiają kosmologię nie dlatego, że chcą poznać Wszechświat, lecz dlatego, iż Jest to piękna nauka. Dziś wielu teoretyków żywi podobny stosunek do teorii mających na celu zjednoczenie całej fizyki. Ale w latach sześćdziesiątych XX wieku w kosmologii obserwacyjnej nastąpił przełom. Zupełnie niespodziewanie odkryto kwazary, pulsary i przede wszystkim mikrofalowe promieniowanie tła. Badania kosmologiczne nabrały ogromnego przyspieszenia. W ciągu kilkunastu lat wygasły wątpliwości co do tego, czy kosmologię można uważać za prawdziwą naukę empiryczną. Ponieważ w nauce nigdy nie należy mówić „nigdy”, nie powinniśmy z góry wykluczać, że coś podobnego stanie się z teoriami unifikacyjnymi.

Trzeba Jednak zgodzić się z tym, że w badaniach nad unifikacją fizyki rzeczywiście znajdujemy się na obrzeżach metody, jaką obecnie powszechnie stosuje się w fizyce. I nie jest wykluczone, że - przynajmniej przez pewien czas - będziemy zmuszeni metodę tę traktować bardziej elastycznie. Jestem przekonany, że gdyby dziś udało się komuś znaleźć matematyczną strukturę, która by bezbłędnie unifikowała całą fizykę i przejrzysto rozwiązywała wszystkie wielkie problemy współczesnych teorii, zostałaaby ona jednogłośnie zaakceptowana przez fizyków, chociaż nie przewidywałaby żadnych nowych efektów

obserwacyjnych. Rozumienie i „wgląd w strukturę” liczą się w fizyce coraz bardziej.

I tu właśnie przechodzimy do rozważań filozoficznych.

W Cambridge odbyło się niedawno naukowe sympozjum pod bardzo wymownym tytułem „W skali Plancka fizyka spotyka się z filozofią”. Istotnie, mieliśmy okazję zaobserwować to na kartach tej książki. Skłonność do stawiania pytań filozoficznych jest głęboko wbudowana w ludzką naturę. Zawsze chcemy wiedzieć „co dalej?”, „skąd się to wzięło?”, „po co to wszystko?”, a każda, nawet hipotetyczna odpowiedź generuje dalsze pytania. Z hipotetycznych odpowiedzi także można wyciągać pewne wnioski. Nasza dotychczasowa eksploracja ery Plancka, choć nie dała jeszcze ostatecznych wyników, nauczyła nas przynajmniej jednego: Wszechświat wcale nie musi być skrojony na naszą miarę. Nasze intuicje, wytworzone przez długotrwałe kontakty ze światem makroskopowym, mogą się okazać mylne w konfrontacji z najgłębszym poziomem Wszechświata. Jeszcze jedna lekcja oduczania się antropocentryzmu! Historia nauki dała nam już ich kilka. Doskonałym przykładem tego rodzaju załamywania się naszych intuicji jest możliwość istnienia poziomu, na którym nie ma czasu i zmienności (w ich zwyczajnym rozumieniu), ale możliwa jest autentyczna dynamika.

Tu rodzi się kolejne pytanie: czy mamy gwarancję, że Wszechświat jest poznawalny, że do końca może zostać przez nas poznany? Nie, takiej gwarancji nie mamy. Dotychczasowe sukcesy nauki u wielu naukowców i filozofów wytworzyły niebywały optymizm poznawczy, ale przecież to, cośmy już poznali, nie uczy nas niczego pewnego o tym, do czegośmy jeszcze nie doszli. Nie widać żadnej konieczności, by ewolucja biologiczna miała jakikolwiek interes w wyposażaniu nas w potężny mózg, który mógłby skutecznie zmierzyć się ze skomplikowaną strukturą całego Wszechświata. I tak Jest dziwne i zaskakujące, że zdołaliśmy poznać aż tyle. Możliwość atomowej samozagłady i zniszczenie całej planety, jaką gatunek ludzki uzyskał kilkadziesiąt lat temu, wcale nie jest atutem w ewolucyjnej walce o przetrwanie.

W pierwszej połowie XX wieku kosmologowie powszechnie sądzili, że Wszechświat jest przestrzennie zamknięty. Do tego przekonania dobudowywano wówczas filozofię głoszącą, że winno tak być, ponieważ w przeciwnym razie Wszechświat nie stałby się w całości poznawalny dla ludzkiego rozumu. Doktrynę tę mocno popierał Georges Lemaitre, motywując ją łaskawością Stwórcy względem ludzi, którym nie chciał stawiać poznawczego zadania ponad ich możliwości. Ostatnio podobnymi racjami, chociaż inspirowanymi przez wręcz przeciwne motywy, Lee Smolin próbował uzasadnić swoje koncepcje dotyczące kwantowej grawitacji. Nawiązywał on do dawnej pozytywistycznej doktryny, według której

to, co wykracza poza możliwości poznawcze człowieka, jest pozbawione Jakiegokolwiek sensu. Chcąc ratować sens kosmologii Jako nauki o Wszechświecie, należy przyjąć, iż jego struktura jest dostępna naszemu poznaniu.

Doktrynie Lemaitre'a można przeciwstawić chrześcijańską koncepcję Transcendencji, zgodnie z którą Bóg - a więc zapewne i Jego dzieła - wykracza poza wszystko, co człowiek jest zdolny pomyśleć. Smolinowi z kolei można by przypomnieć, że pozytywistyczna koncepcja redukcji całej wartościowej wiedzy do tego, co da się bezpośrednio zaobserwować, skompromitowała się sama i nawet „twardzi pozytywiści” musieli ją porzucić. Chociaż, jak wspomniałem wyżej, to, co już poznaliśmy, nie uczy nas niczego pewnego o tym, czegośmy jeszcze nie poznali, lekcja płynąca z dotychczasowej historii nauki jest dość przekonująca: ewolucja wyposażała nas „nadmiarowo” w umysłowe zdolności niezbędne do przetrwania. Ale czy ten naddatek wystarczy do tego, aby poznać wszystko? Nawet jeśli kiedyś, mimo wszystko, stworzymy wreszcie tę wymarzoną teorię unifikującą całą fizykę, jeśli poznamy fundamentalne prawo rządzące wszystkim, ciągle jeszcze pozostanie wiele do poznania i do zrozumienia. Wszechświat bowiem nie jest maszyną, która jedynie realizuje program raz na zawsze ustalony na jego fundamentalnym poziomie. Prawo i przypadek odgrywają ważne i uzupełniające się role w strukturze Wszechświata. Małe zmiany wielkości pewnych parametrów, rządzone grą prawdopodobieństw i statystyką, mogą - na mocy ścisłych praw fizyki - powodować drastyczne zmiany ewolucji świata.

Właśnie tej jego cesze zawdzięczamy, że świat nie jest nudną pustynią, lecz grą ciągle bogacących się struktur.

Poziom fundamentalny to jeszcze nie wszystko. Ustala on tylko dość ogólne reguły gry. Wszechświat strukturalizuje się dzięki strategii przejść fazowych. Sama możliwość tych przejść jest oczywiście zakodowana w prawach poziomu fundamentalnego, ale to, co dzieje się w momencie przejścia fazowego, jest w znacznej mierze dziełem przypadku, lokalnych fluktuacji, Właśnie przejściom fazowym, jakie dokonały się w pierwszych ułamkach sekundy po przekroczeniu progu Plancka, zawdzięczamy to, że pierwotna „fundamentalna prasymetria” uległa spontanicznemu złamaniu na cztery podstawowe oddziaływania fizyczne: grawitację, oddziaływania jądrowe silne i słabe oraz oddziaływanie elektromagnetyczne. Niewykluczone, że gdyby w młodym Wszechświecie „coś było trochę inaczej”, mielibyśmy dziś zupełnie inną fizykę. Znajomość, nawet bardzo dokładna, poziomu fundamentalnego nie określa jednoznacznie wszystkiego, co z niego wyewoluowało. Fizyka Wszechświata to nie tylko fizyka poziomu Plancka, a Wszechświat nie jest jedynie grą podstawowych oddziaływań fizycznych. To także ciągle narastająca hierarchia złożonych struktur: od

agregatów atomów tworzących związki chemiczne aż do supergromad galaktyk. Procesem wzrostu złożoności kieruje wszędzie ta sama strategia. Małe, przypadkowe zmiany pewnych wielkości prowadzą, na mocy ścisłych praw fizyki, do drastycznych zmian dynamicznego procesu. Mechanizm ten, nie całkiem słusznie, przyjęło się nazywać dynamicznym (albo deterministycznym) chaosem. Owszem, ma on cechę nieprzewidywalne własności, ale równocześnie prowadzi do pięknego porządku, jaki obserwujemy w świecie. I właśnie dlatego, że porządek świata nie jest do końca przewidywalny, a zadaniem fizyki jest jego badanie, nie przestanie ona być ciekawą nauką.

Nie można także wykluczyć tego, iż gdy wreszcie odnajdziemy „wyśnioną ostateczną teorię”, okaże się, że wcale nie jest ona „ostateczna”, że nie zamyka „poszukiwań w głąb”, lecz przeciwnie - otwiera nowe horyzonty. Tak dotychczas działo się w historii fizyki: każde osiągnięcie otwierało drogę do następnych. Wszechświat może być niewyczerpywalną strukturą - jak ciąg liczb rzeczywistych: za każdą liczbą jest ich jeszcze nieskończenie wiele.

Pisząc ostatnie strony książki o kwantowaniu grawitacji i kwantowej kosmologii, trudno oprzeć się jeszcze jednej refleksji. Zupełnie niezależnie od tego, czy świat jest do końca poznawalny, czy nie, wszystko dziś wydaje się wskazywać na to, że w naszych badaniach zbliżamy się jednak do jakiejś granicznej sytuacji. Najbanalniejszą, ale równocześnie najbardziej konkretną, jest granica finansowa. Nawet najbogatsze państwa (takie jak Stany Zjednoczone) czy zespoły państw (takie jak Unia Europejska) nie mogą dziś sobie pozwolić na budowanie znacznie większych (w porównaniu do już istniejących) akceleratorów cząstek elementarnych, a bez nich teorie odpowiednio głębokich poziomów świata pozostaną tylko mniej lub bardziej wiarygodnymi domysłami. Ale także w dziedzinie badań czysto teoretycznych wyraźnie widać zbliżanie się do jakiejś bariery. Jeżeli budujemy obecnie modele kwantowego powstawania świata z nicości, to o cóż jeszcze można pytać dalej? O nicość? Pozostaje, oczywiście, pytanie o pochodzenie praw przyrody, ale jest to już pytanie typowo filozoficzne.

Czy jednak nie jesteśmy zbyt zarozumiali? Czy uczeni każdej epoki nie sądzili, że ich badania znajdują się na granicy możliwości? Tak niewątpliwie było, dostrzegam jednak pewną różnicę między tym, co było w historii, a obecną sytuacją. Dawniej chodziło o granice problemów i o granice technicznych możliwości; dziś coraz bardziej chodzi o granice metody. Jeszcze krok dalej i już wchodzimy w obszar filozofii lub wręcz metafizyki. Myśliciele, pozostający pod wpływem pozytywistycznego stylu myślenia, na ogół sądzą, że opuszczając teren kontrolowany przez metodę fizyki, zapuszczamy się w dziedzinę bezsensu. Sądzę, że taki pogląd zakłada bardzo specyficzne rozumienie sensu i jego zaprzeczenia - bezsensu.

Czyżby sens miał się ograniczać do stwierdzenia, że „tak jest, bo jest”, i powstrzymywania się od jakichkolwiek dalszych pytań? Granice metody empirycznej nie są granicami racjonalności. Metoda empiryczna sama domaga się racjonalnych wyjaśnień; więcej - pytanie o sens tej metody wykracza poza jej własne możliwości. Innymi słowy, pytając o sens metody empirycznej, wykraczamy poza nią. A więc jeżeli ma ona jakikolwiek sens, to musi go otrzymywać spoza siebie.

Fizyka to pasjonująca nauka, bo jest naszym Wielkim Pytaniem skierowanym do Rzeczywistości.

Kraków, 20 grudnia 2000

BIBLIOGRAFIA

Ten zestaw bibliograficzny zawiera wybór prac oryginalnych oraz pozycje sugerowane jako lektura uzupełniająca

ROZDZIAŁ 1

P. Davies: Plan Stwórcy. Znak, Kraków 1996.

M. Heller: Wszechświat u schyłku stulecia. Znak, Kraków 1994.

ROZDZIAŁ 2

J. C. Polkinghorne: The Quantum World. Penguin Books, Londyn 1990.

M. Heller: Mechanika kwantowa dla filozofów. OBI - Kraków, Byblos - Tarnów 1996.

ROZDZIAŁ 3

A. H. Guth: Wszechświat inflacyjny. Prószyński i S-ka, Warszawa 2000.

M. Heller: Kosmiczna przygoda Człowieka Mądrygo. Znak, Kraków 1994.

ROZDZIAŁ 4

B. DeWitt: Quantum Theory of Gravity, I: The Canonical Theory. „Physical Review” tom 160, 1967, ss. 1113-1148.

D. Atkatz: Quantum Theory for Pedestrians, „American Journal of Physics” tom 62, 1994, ss. 619-627.

ROZDZIAŁ 5

J. Barrow: Teorie wszystkiego. Znak, Kraków 1995.

ROZDZIAŁ 6

J. Hartle, S. W. Hawking: The Wave Function of the Universe. „Physical Review”, tom D28, 1983, ss. 2960-2975.

S. W. Hawking: Krótka historia czasu. Alfa, Warszawa 1990.

S. W. Hawking, R. Penrose: Natura czasu i przestrzeni. Zysk i S-ka, Poznań 1996.

ROZDZIAŁ 7

S. W. Hawking: Czarne dziury (wszechświaty niemowlęce. Alkazar, Warszawa 1993.

KOSMOLOGIA KWANTOWA 149

ROZDZIAŁ 8

B. Greene: Piękno Wszechświata. Prószyński i S-ka, Warszawa 2001.

ROZDZIAŁ 9

W momencie pisania tego rozdziału oryginalna praca na temat modelu ekpyrotycznego została złożona w redakcji czasopisma „The Physical Review”, ale nie ukazała się jeszcze drukiem. Korzystałem z jej „preprintowej wersji”, opublikowanej w

Internece: J. Khoury, B. A. Ovrut, P. J. Steinhardt, N. Turok: The Ekpyrotic Universe: Colliding Branes and the Origin of the Hot Big Bang, hep-th/0103239 v2.

ROZDZIAŁ 10

R. Penrose: Nowy umysł cesarza. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1995.

R. Penrose: Cienie umysłu. Zysk i S-ka, Poznań 2001.

R. Penrose: Makroświat, mikroświat i ludzki umysł. Prószyński i S-ka, Warszawa 1997.

J. D. Bekenstein: Black-Hole Thermodynamics, „Physics Today”, tom 33 (nr 1), 1980, ss. 42-31.

ROZDZIAŁ 11

A. Connes: Noncommutative Geometry. Academic Press, Nowy Jork 1994. M. Heller, W. Sasin, D. Lambert: Groupoid Approach to Noncommutative Quantization of Gravity, „Journal of mathematical Physics”, tom 41, 1999, ss. 5840-5853.

M. Heller, W. Sasin: Noncommutative Unification of General Relativity and Quantum Mechanics, „International Journal of Theoretical Physics”, tom 38, 1999, ss. 1619-1642.

M. Heller, W. Sasin, Z. Odrzygóźdź: State Vector Reduction as a Shadow of a Noncommutative Dynamics, „Journal of Mathematical Physics”, tom. 41, 2000, ss. 5168-5179.

M. Heller, W. Sasin: Noncommutative Structure of Singularities in General Relativity, „Journal of Mathematical Physics”, tom. 37, 1996, 5665-5671.

M. Heller, W. Sasin: Origin of Classical Singularities, „General Relativity and Gravitation”, tom 31, 1999, ss. 555-570.

ROZDZIAŁ 12

B. Greene: Piękno Wszechświata. Prószyński i S-ka, Warszawa 2001 (rozdział 15).