

Leszek M. SOKOŁOWSKI

CZAS A GRAWITACJA KWANTOWA

1. IDEA KWANTOWANIA GRAWITACJI

Wspólnym rdzeniem wszystkich form czasu, z jakimi mamy do czynienia w naukach przyrodniczych i humanistycznych, prozie i poezji, filozofii i sztuce, jest czas fizyczny. Jego koncepcja ukształtowała się w pierwszej połowie dwudziestego wieku i przez parędziesiąt lat wydawało się, że w obrębie fizyki nie sprawi żadnych kłopotów. Tak jednak się nie stało. Trudności pojawiły się w obrębie kwantowej grawitacji.

Kwantowa grawitacja jest dziwacznym działem fizyki — nieistniejącym, a zarazem wielce pożądanym. Grawitacja jest oddziaływaniem uniwersalnym, bowiem każdy obiekt fizyczny, czyli każdy nośnik energii, oddziałuje grawitacyjnie. Z drugiej strony, z doświadczenia wiadomo, że wszelka materia na poziomie mikroskopowym (i nie tylko) ma naturę kwantową. Jest więc ze wszech miar zasadne przypuszczać, że również grawitacja jest w swej istocie kwantowa. Ściślej mówiąc, wprawdzie kwantowego charakteru grawitacji nie udowodniono, lecz nie ma też argumentów przeciwnych — istniejące (nieliczne) sugestie, że grawitacja jest oddziaływaniem, które nie dopuszcza lub nie potrzebuje kwantowania, okazały się błędne. W dotychczasowych eksperymentach laboratoryjnych i obserwacjach astronomicznych kwantowa natura grawitacji nie ujawnia się. Nic w tym dziwnego: siły grawitacyjne są w nich słabe, nie zdołaliśmy jeszcze zaobserwować ani jednego zjawiska, w którym grawitacja byłaby naprawdę silna. Zresztą

*UWAGA: Tekst został zrekonstruowany przy pomocy środków automatycznych; możliwe są więc pewne błędy, których sygnalizacja jest mile widziana (obi@opoka.org). Tekst elektroniczny posiada odrębną numerację stron.

efekty kwantowe nawet w silnym polu grawitacyjnym nie muszą być łatwo widoczne. Dla porównania, w świetle widzialnym lampy elektrycznej czy Słońca wcale nie jest łatwo dostrzec jego kwantową strukturę — że jest rojem fotonów; wykryto to dopiero na początku naszego stulecia w specjalnych eksperymentach, wykonanych dla sprawdzenia hipotezy Einsteina.

Przypuszcza się, że naturalną skalą zjawisk kwantowej grawitacji, jest tzw. skala Plancka. Opis zjawisk kwantowej grawitacji wymaga użycia trzech stałych fundamentalnych: newtonowskiej stałej ciężenia G , oznaczającej, że oddziaływanie jest grawitacyjne, prędkości światła c , bowiem jest ono relatywistyczne oraz stałej Plancka h , koniecznej w teorii kwantów. Z tych 3 stałych można skonstruować dowolną wielkość mianowaną, biorąc odpowiednie ich potęgi, najczęściej ułamkowe. (Już w tym kwantowa grawitacja różni się od innych pól kwantowych, np. od pola elektromagnetycznego. W elektrodynamice kwantowej oprócz c i h występuje ładunek elektronu e , lecz w odróżnieniu od G nie jest on wielkością od nich niezależną, bowiem stosunek e^2/hc jest liczbą bezwymiarową — tzw. stałą struktury subtelnej. Z dwu stałych fundamentalnych, h i c , można zbudować niewiele wielkości mianowanych.) Wielkości te wyznaczają skalę Plancka, która w odniesieniu do zwykłych, znanych zjawisk kwantowych jest albo bardzo wielka, albo bardzo mała. Rozważmy zderzenie dwu elektronów, z których każdy ma relatywistyczną energię rzędu energii Plancka $E_P = 10^{19}$ GeV; jest to energia kinetyczna samolotu o masie 60 ton lecącego z prędkością 900 km/h. Zderzenia samolotów w powietrzu zdarzały się, jest to wielka katastrofa, lecz efektów kwantowej grawitacji tam nie było. W zderzeniu elektrony muszą zbliżyć się do siebie na odległość niewiele różną od długości Plancka $L_P = 10^{-33}$ cm, czyli 10^{20} razy mniejszą od średnicy protonu. Widać stąd, że w grę wchodzi tylko cząstki punktowe, a nukleony i całe atomy są wykluczone. Jeżeli zatem dwa elektrony o energiach rzędu E_P zbliżą się na odległość rzędu L_P , to można spodziewać się, że efekty kwantowej grawitacji będą silne i wyraźnie odmienne od tego, co przewidują teorie klasycznej (tj. niekwantowej) grawitacji. Oczekiwać więc należy, że zjawiska

kwantowej grawitacji są bardzo egzotyczne w porównaniu z dostępną nam fizyką; szukać ich trzeba we wczesnym Wszechświecie tuż po Wielkim Wybuchu i głęboko we wnętrzu czarnych dziur (a nie przy ich horyzoncie) — w obu przypadkach są w najbliższym sąsiedztwie osobliwości czasoprzestrzennych. Zjawiska te nie są bezpośrednio obserwowalne.

Kwantowa grawitacja nie jest jedynie fizyką kwantowych zjawisk grawitacyjnych. (Tu uwaga terminologiczna. Nazwą „kwantowa grawitacja” obejmuje się zarówno ten dział fizyki, jak i teorię tych zjawisk.) Nie jest tylko kwantową teorią jeszcze jednego pola fizycznego — grawitacyjnego, obok elektrodynamiki kwantowej i chromodynamiki kwantowej. Ze względu na uniwersalność grawitacji uważa się, że kwantowa teoria grawitacji będzie stanowić zasadniczy i niezbędny element teorii fundamentalnej — teorii unifikującej wszystkie cząstki elementarne i wszystkie oddziaływania. Stąd wynikają usilne dążenia do skonstruowania teoretycznie kwantowej grawitacji, mimo że empirycznie nic nas do tego nie zmusza.

Kwantowej grawitacji nie można konstruować od zera. Podobnie jak w przypadku pozostałych oddziaływań, tworzy się ją stosując procedurę kwantowania do pewnej klasycznej teorii grawitacji. Najczęściej kwantuje się ogólną teorię względności (OTW) Einsteina, czasami pewne jej rozszerzenia. W ostatnim dziesięcioleciu bardzo popularne wśród badaczy stało się kwantowanie teorii superstrun, w wyniku czego grawitacja pojawia się jako jedno z szeregu kwantowych oddziaływań; teoria superstrun ma jednak wiele własnych kłopotów, a ponadto relatywiści mają zastrzeżenia co do pewnych jej założeń, a tym samym i do jej obecnych i przyszłych wyników.

W powszechnym przekonaniu kwantowa grawitacja ma być spójnym połączeniem w jedną teorię ogólnej teorii względności i kwantowej teorii pola (pojmowanej jako ogólny schemat kwantowego opisu pól fizycznych istniejących również w postaci klasycznej). Kłopot w tym, że obie teorie są bardzo odmienne. Kwantowa teoria pola stanowi fundament większości fizyki i kształtuje sposób myślenia fizyków zajmujących się cząstkami elementarnymi. OTW jest swoistą

teorią, zajmującą się czasoprzestrzenią, czyli areną, na której cała fizyka się rozgrywa. Arenie tej odbiera statyczny, absolutny charakter, jaki ma ona w całej pozostałej fizyce i utożsamia ją z uniwersalnym oddziaływaniem — grawitacją. Współczesna fizyka teoretyczna składa się z dwu członów: jednym jest teoria kwantów, z której wyprowadzić też można fizykę klasyczną, drugim — OTW. Obie teorie słabo do siebie przystają, bowiem zgadzają się jawnie tylko w granicy bardzo słabych oddziaływań grawitacyjnych: wówczas OTW przechodzi w szczególną teorię względności (STW), czyli fizycznie zinterpretowaną geometrię czasoprzestrzeni Minkowskiego, a ta tworzy arenę dla całej fizyki kwantowej i klasycznej w nieobecności grawitacji. Zgodność obu teorii w granicy, w której OTW staje się trywialna, sprawia, że podstawowy problem brzmi: jak zunifikować OTW i teorię kwantów w spójną całość, jakie cechy charakterystyczne dla każdej z nich muszą przy tym zginąć, jakie nowe kategorie muszą się pojawić?

Odpowiedzi nie znamy. Pierwsza wzmianka o tym, że grawitacja ma naturę kwantową, pochodzi od Einsteina z 1918 r. W latach trzydziestych i czterdziestych sporadycznie pojawiały się prace na ten temat, a w 1950 r. Paul Dirac rozpoczął systematyczne badania tzw. kanonicznego kwantowania grawitacji. Przez następne pół wieku niemal wszyscy czołowi fizycy zajmujący się cząstkami elementarnymi, teorią pola i teorią grawitacji podejmowali najrozmaitsze próby skwantowania grawitacji. W pięćdziesiątą rocznicę rozpoczęcia badań można stwierdzić, że ogromny wysiłek intelektualny dużej grupy wybitnych uczonych przyniósł wyniki nader skromne. Na początku badacze natknęli się na ogromne trudności matematyczne. W miarę intensyfikowania badań trudności te rosły zamiast maleć, co gorsza, stopniowo zdano sobie sprawę, że za przeszkodami matematycznymi stoją fundamentalne trudności konceptualne. Nie wiadomo bowiem czego się trzymać, wszystkie pojęcia solidnie umocowane na gruncie dotychczasowej fizyki, przeniesione w obszar kwantowej grawitacji tracą pewność i solidność i przy bliższym przyjrzeniu się im bardziej kwalifikują się do wyrzucenia, niż do opisu procesów w kwantowych polach grawitacyjnych. Dotyczy to pojęcia czasoprzestrzeni, ewolu-

cji w czasie, prawdopodobieństwa, wektora stanu (funkcji falowej), pomiaru. Wszystko staje się płynne, mgliste, niezgodne z dotychczasową interpretacją. Nic więc dziwnego, że wszystkie znane w kwantowej teorii pola metody kwantowania pól klasycznych zawiodły wobec OTW. Można odnieść wrażenie, że teoria Einsteina broni się — bardzo skutecznie — przed próbami skwantowania jej.

Najbardziej chyba wyrazistym sygnałem trudności z unifikacją kwantowej teorii pola z OTW jest czas. Co to jest czas? Jak powiedziałem na początku, interesuje nas czas w fizyce, stanowiący nieredukowalne jądro wszelkich koncepcji i form postrzegania czasu we wszystkich dziedzinach intelektualnej aktywności człowieka. Najgłębszej, najbardziej fundamentalnej koncepcji czasu dostarcza nam OTW Einsteina. Kłopot tkwi w tym, że fizyka kwantowa używa pojęcia czasu nie w tym najpełniejszym ujęciu, opartym na OTW, lecz na uproszczonej jego wersji, powstającej przy przejściu od OTW do STW, czyli w granicy znikających oddziaływań grawitacyjnych. Mówiąc obrazowo: kwantowa grawitacja obejmuje zjawiska ekstremalnie silnych pól grawitacyjnych, a zarazem opis kwantowy wymaga takiego sformułowania pojęcia czasu, które ma sens tylko przy zaniechaniu słabym polu grawitacyjnemu.

2. CZAS JAKO ASPEKT ZGEOMETRYZOWANEJ GRAWITACJI

Według OTW czas nie jest pojęciem pierwotnym, jakim był według Newtona w fizyce klasycznej („absolutny, prawdziwy i matematyczny czas upływa równomiernie sam przez się i z samej swej istoty, bez względu na jakikolwiek przedmiot zewnętrzny i zwie się inaczej trwaniem...”). Czas jest pojęciem definiowanym na obiekcie fundamentalnym — czasoprzestrzeni. Ponieważ OTW jest geometrycznie sformułowaną teorią grawitacji, czas też jest pojęciem odniesionym do grawitacji, zdefiniowanym za pomocą wielkości czysto geometrycznych. Matematyczny model fizycznej czasoprzestrzeni powstaje przez nałożenie na siebie kolejno czterech struktur matematycznych. Strukturą leżącą najniżej, czyli obiektem podstawowym, jest czaso-

przestrzeń pojmowana wyłącznie w sensie teorii mnogości, czyli zbiór zdarzeń elementarnych, które nazywamy punktami. Zdarzenie elementarne jest pojęciem pierwotnym, niedefiniowanym. Intuicyjnie jest nim zjawisko momentalne i przestrzennie nierozciągłe, takie jak zderzenie dwu cząstek elementarnych. Często mówi się przy tym, że w zdarzeniu elementarnym interesuje nas nie to, co się faktycznie zdarzyło, lecz „gdzie i kiedy”; nie jest to ścisłe, bowiem „gdzie i kiedy” już implikuje istnienie współrzędnych czasowych i przestrzennych zdarzenia, a tych jeszcze nie można zdefiniować. Zbiorowi zdarzeń elementarnych można przypisać jedną własność — moc, przyjmujemy, że jest on nieprzeliczalny. Na ten zbiór nakłada się strukturę przestrzeni topologicznej, tj. definiuje się zbiory otwarte i domknięte, co pozwala określić pojęcia bliskości, ciągłości i odwzorowań topologicznych, czyli odwracalnych i w obie strony ciągłych. Definicja zbiorów otwartych musi być taka, by spełniony był postulat Hausdorffa: dwa różne punkty można zawsze rozdzielić zbiorami otwartymi. Na tym etapie czasoprzestrzeni nie można jeszcze jednoznacznie przypisać wymiaru. Będzie to możliwe dopiero po wprowadzeniu trzeciej struktury — różniczkowej. Zakłada ona, że dla każdego dostatecznie małego zbioru otwartego istnieje odwzorowanie topologiczne przeprowadzające ten zbiór w pewien zbiór otwarty jednej i tej samej przestrzeni euklidesowej o pewnym wymiarze. Mówiąc obrazowo, każdy niewielki fragment czasoprzestrzeni wygląda jak kawałek przestrzeni Euklidesa. Dzięki temu można wprowadzić układy współrzędnych krzywoliniowych w czasoprzestrzeni — są nimi współrzędne kartezyjańskie w odpowiadającym danemu fragmentowi kawałku przestrzeni euklidesowej (bez tej lokalnej topologicznej równoważności zbiorów otwartych w obu przestrzeniach współrzędne nie mają sensu). Oczywiście wymiar czasoprzestrzeni równy jest wymiarowi odpowiedniej przestrzeni euklidesowej; w oparciu o eksperyment postuluje się, że są cztery wymiary. Dzięki lokalnej równoważności z przestrzenią euklidesową można różniczkować funkcje i wektory określone na czasoprzestrzeni, nadal natomiast nie jest określona odległość punktów bliskich. Do tego ostatniego celu służy czwarta struktura — struk-

tura przestrzeni pseudoriemannowskiej (zwanej ostatnio przestrzenią Lorentza): na czasoprzestrzeni zadany jest tzw. tensor metryczny, za pomocą którego określa się długość wektorów i odległość punktów bliskich (a stąd wynika długość dowolnej krzywej). Odległość nie spełnia zwykłej nierówności trójkąta, będącej fundamentalną własnością odległości w przestrzeni euklidesowej, lecz tzw. odwrotną nierówności trójkąta, bowiem lokalnie fizyka musi być zgodna z STW, tzn. w dowolnym punkcie czasoprzestrzeni musi istnieć taki układ współrzędnych (zwany „swobodnie spadającą windą”), w którym w tym punkcie tensor metryczny równy jest tensorowi metrycznemu Minkowskiego w płaskiej czasoprzestrzeni STW. Relacja STW do OTW jest więc dokładnie relacją płaszczyzny do dowolnej powierzchni zakrzywionej (do której płaszczyzna ta jest styczna w wybranym punkcie). Ta własność „pseudoriemannowskości” tensora metrycznego (zwanego krótko metryką) powoduje, że struktura topologiczna czasoprzestrzeni nie jest w pełni zgodna z jej strukturą metryczną: kula metryczna o danym promieniu, czyli zbiór punktów, dla których kwadrat odległości od wybranego punktu (środku kuli) jest nie większy od pewnej liczby dodatniej, nie tworzy zbioru topologicznie zwartego; na szczęście nie powoduje to dużych kłopotów. Z matematycznego punktu widzenia czasoprzestrzeń jest parą różniczkowa, metryka. W OTW dolne trzy struktury czasoprzestrzeni są ustalone raz na zawsze (są „elementem absolutnym” teorii), natomiast fizyczną wielkością dynamiczną jest sama metryka, którą utożsamia się z polem grawitacyjnym. (To jest źródłem fundamentalnego dla kwantowej grawitacji problemu: co kwantować? Kierując się powyższym podziałem na część absolutną i część dynamiczną OTW, zwykle kwantuje się metrykę przy ustalonych trzech pozostałych strukturach. Istnieją jednak argumenty, że w teorii kwantowej podział ten przebiega inaczej. Fluktuacje kwantowe mogą dotyczyć nie tylko odległości, czyli metryki, fluktuować może też struktura różniczkowa, topologia, a nawet sam zbiór zdarzeń elementarnych. Kłopot w tym, że zupełnie nie wiadomo jak kwantować te struktury. Głośne w latach osiemdziesiątych pomysły Stephena Hawkinga zawierały ideę częściowego specyficznego kwantowania to-

pologii; obecnie pomysły te są poddawane krytyce. Należy przypuszczać, że kwestii tej nie rozwiąże się bez nowej idei fizycznej, a na tę trudno liczyć bez wsparcia ze strony doświadczenia. W rezultacie niemal cały wysiłek badaczy koncentruje się na kwantowaniu metryki przy niezmiennych pozostałych strukturach matematycznych czasoprzestrzeni.)

W tak skonstruowanej czasoprzestrzeni wszystkie linie krzywe wychodzące z dowolnego jej punktu dzielą się na 3 klasy — krzywe takie, że kwadrat ich długości (liczony np. od tego punktu) jest dodatni, ujemny lub równy zeru. W czasoprzestrzeni płaskiej (czyli Minkowskiego) krzywe o zerowej długości wychodzące z jednego punktu zakreślają tzw. stożek świetlny i nazwy tej używa się też w dowolnie zakrzywionej czasoprzestrzeni OTW, mimo że niejednokrotnie krzywe te tworzą figurę bardzo zdeformowaną w stosunku do stożka. Interesują nas krzywe, których kwadrat długości jest dodatni — zwane są one krzywymi czasopodobnymi i leżą wewnątrz stożka świetlnego. Wy różniamy je dlatego, że jest uniwersalną własnością materii, ustaloną czysto empirycznie, iż wszystkie cząstki (czyli ciała o zaniedbywalnie małych rozmiarach przestrzennych) o różnej od zera masie spoczynkowej mają linie świata, czyli swoje historie (będące zbiorem wszystkich zdarzeń elementarnych dla danej cząstki), które są liniami czasopodobnymi. Cząstki o masie spoczynkowej równej zeru, np. fotony i neutrina (?) zakreślają w czasoprzestrzeni linie świata będące krzywymi zerowymi, np. fotony wyemitowane jako momentalny błysk świetlny z punktowej lampy wytyczają w czasoprzestrzeni stożek świetlny.

Dla fizyka czasem jest to, co mierzy dobry zegar; zegarami są urządzenia oparte na rozmaitych zjawiskach periodycznych. Zegary muszą mieć masę, a zakładając, że są nieduże, przypisujemy im pojedyncze czasopodobne linie świata. Okazuje się, że czas fizyczny odmierzany przez dowolnie wybrany zegar poruszający się w zadany sposób w czasoprzestrzeni, ma bezpośredni sens geometryczny — równy jest (w jednostkach mających wymiar długości) długości jego linii świata liczonej od dowolnie wybranego punktu na niej. Stwierdził to Einstein formułując STW i własność ta przenosi się bez zmian na zakrzywione

czasoprzestrzenie reprezentujące grawitację w OTW. Własność ta nie zależy od konkretnej fizycznej natury zegara — dowolne dwa zegary mające tę samą linię świata odmierzą ten sam czas fizyczny będący jej długością. Czas jest nierozzerwalnie związany z krzywymi czasopodobnymi i tylko w odniesieniu do konkretnej krzywej jest sens mówić o upływie czasu fizycznego, czyli o długości interwału czasowego pomiędzy dwoma zdarzeniami leżącymi na niej. Jeżeli dwa punkty w czasoprzestrzeni łączą dwie różne krzywe czasopodobne, to czas między tymi punktami liczony wzdłuż każdej z krzywych będzie na ogół odmienny. Nie ma czegoś takiego jak „przedział czasu między dwoma zdarzeniami” — można go określić tylko dla konkretnie wybranej krzywej łączącej te zdarzenia. W czasoprzestrzeni jest dokładnie tak samo jak w geometrii Euklidesa: odległość, jaką przebywam jadąc pociągiem z Krakowa do Warszawy zależy od tego, czy jadę Centralną Magistralą Kolejową (niepełne 300 km), czy też przez Wrocław i Szczecin.

Oczywiście w geometrii Euklidesa funkcjonuje pojęcie odległości jako takiej między dwoma punktami, ale tu również występuje długość krzywej: odległością dwu punktów nazywamy długość najkrótszej krzywej je łączącej, czyli linii prostej. Podobnie na kuli ziemskiej odległością dwu punktów nazywamy długość łuku koła wielkiego między tymi punktami. W zakrzywionej czasoprzestrzeni nie ma linii prostych ani kół wielkich, ich rolę przejmują geodetyki: czasowe, przestrzenne i zerowe; fizycznie wyróżnione są geodetyki czasowe. Na powierzchni Ziemi odległości zdefiniowane za pomocą kół wielkich nie mają znaczenia praktycznego: odległości między miastami podaje się zawsze jako odległości drogowe i kolejowe, czyli wzdłuż krzywych niemal zawsze różnych od geodetyk — nie sposób podróżować po trasie wyrysowanej na mapie „od linijki”. Wybudowanie nowej autostrady lub linii kolejowej zmienia odległość! W czasoprzestrzeni można poruszać się po geodetyce czasowej: w tym przypadku obserwator spada swobodnie w polu grawitacyjnym, np. Ziemia spada swobodnie w polu ciężkości Słońca. W jednym czasoprzestrzeń różni się istotnie od przestrzeni euklidesowej: u Euklidesa linia prosta łącząca dwa punkty jest

krzywą najkrótszą, natomiast geodetyka czasowa jest ze wszystkich krzywych łączących w czasoprzestrzeni dwa punkty linią najdłuższą. Widać to stąd, że przedział czasu fizycznego między dwoma punktami na geodetyce czasowej jest dodatni, natomiast punkty te można połączyć też linią łamaną, której każdy odcinek jest krzywą o długości zerowej, zatem długość całej linii między tymi punktami też jest równa zero. Z tego właśnie powodu w czasoprzestrzeni odwrotna nierówność trójkąta pełni tę rolę, jaką u Euklidesa gra zwykła nierówność trójkąta.

Warto tu dodać, że fakt, iż czas fizyczny jest zrelatywizowany do konkretnej krzywej czasopodobnej (fakt ten sprawia, że w teorii względności czas ten nazywamy czasem własnym obserwatora, dla którego krzywa ta jest linią świata) pozwala prosto rozwiązać sławetny paradoks bliźniąt. Przez pierwszą część życia obaj bliźniacy mają wspólną linię świata, zatem ich wiek mierzony czasem fizycznym (pokrywającym się z czasem biologicznym) jest ten sam; w pewnym momencie jeden z nich wyrusza z relatywistyczną prędkością w podróż do pobliskiej gwiazdy i z powrotem, a drugi pozostaje na Ziemi. Pomiędzy rozstaniem i powrotem drugi bliźniak ma linię świata niewiele różną od geodetyki czasowej, natomiast astronauta, podróżujący z prędkościami przyświelnymi, zakreśla linię świata zbliżoną do krzywej zerowej (linii świata fotonu), której długość między tymi punktami jest zatem mała. Wynika stąd, że czas własny astronauty pomiędzy startem i powrotem jest krótszy od czasu własnego bliźniaka pozostającego na Ziemi, astronauta okazuje się więc od niego biologicznie młodszy. Przy powyższym rozumieniu czasu fizycznego wynik ten jest oczywisty i żadnego paradoksu nie ma. Wbrew błędnym sugestiom w niektórych książkach, obecność pola grawitacyjnego nie odgrywa tu zasadniczej roli. Grawitacja wpływa na efekt różnicowania wieku bliźniąt tylko ilościowo: w nieobecności grawitacji i przy zadanej prędkości lotu (jako funkcji czasu ziemskiego), wyliczenie o ile astronauta będzie po powrocie młodszy od brata, jest łatwe, natomiast przy uwzględnieniu rozmaitych pól ciężkości (Ziemi, Słońca,

docelowej gwiazdy itp.) rachunki znacznie się komplikują, lecz końcowy efekt jest jakościowo ten sam.

Interwał fizycznego czasu, czyli długość określonej krzywej czasopodobnej między dwoma jej punktami (zdarzeniami), zależy od geometrii (krzywizny) czasoprzestrzeni, która określona jest przez jej metrykę. Fizycznie krzywiznę utożsamiamy z polem grawitacyjnym (ściślej: ze zmianami pola grawitacyjnego od punktu do punktu, czyli z tzw. siłami pływowymi, które np. powodują przypyły morskie). Zatem czas to pewien geometryczny aspekt grawitacji. Często mówi się, że grawitacja wpływa na bieg czasu, że powoduje, iż płynie on nierównomiernie. Jest to niepoprawne. Nie jest tak, że odrębnie mamy grawitację i czas, a grawitacja zaburza upływ czasu. Czas jest nierozdzielnie związany z grawitacją, podobnie jest z przestrzenią. Nie wynika stąd bynajmniej, że w nieobecności oddziaływań grawitacyjnych, czyli w płaskiej czasoprzestrzeni Minkowskiego, czas i przestrzeń znikają. W nieobecności grawitacji własności czasu i przestrzeni upraszczają się ogromnie i te najprostsze postaci czasu i przestrzeni (dodatkowo przy założeniu, że wszystkie prędkości są małe, więc można zaniedbać efekty STW) są tymi, które intuicyjnie utożsamiamy z czasem i przestrzenią jako takimi. Żyjemy po prostu w części Wszechświata, gdzie siły grawitacyjne są słabe i bardzo wolno zmienne; gdybyśmy żyli w rejonach „burzliwych”, np. w obszarze działania silnych fal grawitacyjnych lub w pobliżu osobliwości czasoprzestrzennej, to lokalność czasu i jego przypisanie do konkretnych linii świata, byłoby ewidentne. Inna rzecz, że formułowanie adekwatnych pojęć fizycznych i konstruowanie z nich teorii byłoby tam dużo trudniejsze.

Ten czas fizyczny, o którym dotąd mówiłem, nie wyczerpuje koncepcji czasu istniejącej w fizyce i w samej OTW. Jest on wyróżniony, bowiem jest bezpośrednio mierzony dobrymi zegarami. Istnieje jeszcze „czas współrzędnościowy”, czyli współrzędna czasowa w pewnym układzie współrzędnych związanym z pewnym układem odniesienia. Mówiąc poglądowo, lecz nieściśle, tniemy całą czasoprzestrzeń na pewną liczbę fragmentów i w każdym z nich wprowadzamy odrębny układ współrzędnych, bowiem w dowolnej zakrzywionej czasoprze-

strzeni na ogół nie da się wprowadzić takiego układu współrzędnych, który by ją całą pokrywał; jednym z nielicznych wyjątków jest płaska czasoprzestrzeń, którą można pokryć jednym kartezjańskim układem współrzędnych (globalnych układów kartezjańskich jest w rzeczywistości nieskończenie wiele i każdy z nich odpowiada innemu inercjalnemu układowi odniesienia). Układ współrzędnych ma więc również charakter lokalny w tym sensie, że obejmuje tylko pewien (może być bardzo duży) fragment czasoprzestrzeni. Nie wdając się w szczególności geometryczne, powiem tylko, że spośród czterech współrzędnych w danym układzie można wyróżnić jedną — czasową. Zwykle fizycy też nazywają ją czasem, co powoduje liczne nieporozumienia wśród laików. Ma ona prosty sens geometryczny: za jej pomocą obszar czasoprzestrzeni pokryty tym układem zostaje rozwarstwiony na trójwymiarowe hiperpowierzchnie, na których ta zmienna czasowa jest stała. Hiperpowierzchnie te są przestrzennopodobne w tym sensie, że każda krzywa leżąca na nich jest krzywą przestrzennopodobną (kwadrat jej długości jest ujemny), zatem zasadne jest uważać je za „chwilowe” przestrzenie fizyczne. Wybór układu współrzędnych oznacza zatem wybór pewnego rozdzielenia (w danym obszarze) czasoprzestrzeni na czas i przestrzeń. Takich rozkładów może być oczywiście w danym obszarze nieskończenie wiele. Ta zmienna czasowa numeruje chwilowe 3-przestrzenie, które są zbiorami zdarzeń równoczesnych w tym sensie, że każde dwa zdarzenia na danej hiperpowierzchni mają tę samą współrzędną czasową. Współrzędna czasowa ma oczywiście własność, którą intuicyjnie przypisujemy „czasowi”: monotonicznie narasta wzdłuż każdej krzywej czasopodobnej i zerowej. Natomiast duża dowolność wyboru tej współrzędnej sprawia, że jest mniej fizyczna: na ogół w danej czasoprzestrzeni nie ma krzywych czasopodobnych (oczywiście chodzi tu o obszar objęty rozpatrywanymi współrzędnymi), których długość byłaby równa wartości tej współrzędnej czasowej. Innymi słowy współrzędna czasowa nie jest czasem własnym dla żadnego zegara, jest więc niemierzalna. Przykładem jest standardowa współrzędna czasowa (związana z czasowym wektorem Killinga) w czasoprzestrzeni Schwarzschilda.

Dla zupełności warto chyba jeszcze zrobić komentarz o ulubionej nie tylko przez filozofów idei „upływu czasu”. W fizyce ma ona konkretny sens: ponieważ każdy obiekt fizyczny (z masą spoczynkową) porusza się po czasopodobnej linii świata, to wzdłuż *każdej* takiej linii świata zarówno czas fizyczny (własny), jak i dowolna współrzędna czasowa narastają monotonicznie. Częstki elementarne bez masy (fotony, neutrino) zakreślają zerowe linie świata, dla których czas własny nie istnieje (bo nie istnieje układ odniesienia, w którym spoczywają), natomiast współrzędna czasowa również narasta wzdłuż nich monotonicznie. Ten fakt jest ścisłym geometrycznym sformułowaniem spostrzeżenia, że „można stanąć w przestrzeni, lecz nie można zatrzymać się w czasie”. Upływ czasu jest uniwersalny: dla każdego obiektu fizycznego czas zmienia się wzdłuż jego linii świata. Ale jest to uniwersalność zmiany, a nie samego czasu, bowiem nie jest to ten sam czas — przeciwnie, dla ciał z masą wyróżniony fizycznie jest czas własny, a ten jest dla każdej linii świata inny; foton nie ma własnego zegara i dla niego upływa tylko dowolnie wybrana współrzędna czasowa. Należy tu podkreślić z naciskiem, że uniwersalność faktu, że „każdy czas płynie”, jest skutkiem czysto empirycznego wyróżnienia linii czasopodobnych i zerowych jako jedynych możliwych linii świata ciał fizycznych. Gdyby istniały hipotetyczne cząstki elementarne, dla których kwadrat masy jest ujemny, zwane tachionami, to poruszałyby się (względem dowolnego inercjalnego układu odniesienia zbudowanego z ciał i zegarów i dodatkowo masie spoczynkowej) z prędkościami większymi od prędkości światła (wbrew niektórym stwierdzeniom teorii względności jako taka nie wyklucza istnienia takich cząstek, jest to kwestia doświadczenia) i ich liniami świata byłyby krzywe przestrzenopodobne — ich długość jest urojona w sensie liczb zespolonych. Dla tachionów mielibyśmy efekt odwrotny: „uniwersalność zmiany położenia” — mogłyby stać w czasie i przemieszczać się w przestrzeni (z nieskończoną prędkością).

Ogólnie należy stwierdzić, że w dowolnej zakrzywionej czasoprzestrzeni spełniającej równania OTW nie istnieje żaden wyróżniony czas obejmujący wszystkie jej punkty (zdarzenia). Czas jest określony

lokalnie i jest wielkością dynamiczną, gdyż jest właściwością pola grawitacyjnego. Z eksperymentalnego więc punktu widzenia każda czasoprzestrzeń z metryką będącą rozwiązaniem równań Einsteina jest fizyczna. Wśród nich istnieją takie, w których da się dokonać rozwarstwienia całej czasoprzestrzeni (a nie tylko jej fragmentu) na 3-wymiarowe hiperpowierzchnie przestrzennopodobne, czyli na przestrzenie zdarzeń równoczesnych. Parametr numerujący te hiperpowierzchnie ma więc własności współrzędnej czasowej i nosi nazwę „czasu kosmicznego” lub „czasu globalnego”; rozwarstwienie to nie jest jednoznaczne i czasów kosmicznych jest wiele. Zazwyczaj nie jest on czasem własnym dla jakiegokolwiek krzywej czasopodobnej. Nasuwa się pytanie, czy czasoprzestrzeń z czasem kosmicznym nie są lepsze z punktu widzenia reszty fizyki od tych, które go nie dopuszczają. Ogólniej: czy istnieją globalne cechy czasoprzestrzeni, które są pożądane z punktu widzenia innych teorii fizycznych, czy na OTW nie należałoby nałożyć dodatkowych reguł selekcji? Kwestia jest bardzo delikatna, bowiem istnieją argumenty (nie dowody), że geometria i fizyka całego Wszechświata nie jest poznawalna (Wszechświat jest zbyt wielki i w różnych częściach odmienny), że dla naszych badań dostępny jest tylko pewien jego fragment, chociaż bardzo duży, zatem próba odrzucania jako „niefizyczne” pewnych rozwiązań równań Einsteina za pomocą kryteriów odnoszących się do własności globalnych jest dość ryzykowna. Takie kryteria wprowadza się jednak ze względu na pewne zastosowania, których tu nie mogę omawiać. Wspomnę o dwu możliwych kryteriach wyboru.

Jest uprzedzeniem fizyków, wynikającym nie z doświadczenia, lecz z filozoficznej wiary w otwartą przyszłość, w czas linearny, a nie kołowy, że odrzucają czasoprzestrzeń z zamkniętymi liniami czasopodobnymi, np. rozwiązanie Gödla. Zamknięte linie świata nie łamią naiwnie pojętej przyczynowości, tzn. nie można spodziewać się, że przesuwając się po takiej linii świata i powróciwszy do roku 1900, można uśmiercić własnego dziadka w dzieciństwie i zapytać „to skąd ja się wziąłem?”. Wiedza, że dana linia świata jest zamknięta, oznacza, że znamy wszystkie zdarzenia na niej, a zatem z założenia nie

już nie można na niej zmienić. Jednak dla konceptualnej prostoty i dla psychologicznego poczucia bezpieczeństwa nakładamy warunek wykluczający zamknięte linie czasopodobne.

Drugie kryterium odwołuje się do przewidywalności. Chcielibyśmy, by równania ewolucji dla dowolnego obiektu fizycznego, np. równania Maxwella dla pola elektromagnetycznego, posiadały jednoznaczne rozwiązania w całej czasoprzestrzeni. Oznacza to, że gdy zadamy wartości pola elektrycznego i magnetycznego równocześnie w całej przestrzeni (co jest praktycznie niewykonalne, lecz tą kwestią fizycy nie przejmują się), to równania opiszą propagację tego pola w przyszłości i przeszłości wszędzie, tzn. nie będzie takiego zakątka czasoprzestrzeni, w którym pole to nie byłoby jednoznacznie wyznaczone przez te wartości początkowe. Podobnie ma być dla wszystkich innych równań ewolucyjnych. Czasoprzestrzenie, w których jest to możliwe, nazywamy „globalnie hiperbolicznymi” lub — równoważnie — „posiadającymi powierzchnię Cauchy’ego”. Jeżeli raz ustalimy co się dzieje na powierzchni Cauchy’ego, to więcej nie mamy żadnej możliwości manewru: cała fizyka, wszystkie zjawiska zachodzące w przyszłości i przeszłości tej powierzchni są zdeterminowane przez dynamikę i nic już nigdzie nie można zmienić, wszystko jest zaprogramowane „do końca świata”. Kryterium globalnej hiperboliczności jest bardzo eleganckie matematycznie i przez to atrakcyjne, takie czasoprzestrzenie dobrze się bada matematycznie, lecz dla fizyka jest to ograniczenie zbyt mocne. Nie spełnia go szereg w pełni akceptowanych rozwiązań równań Einsteina, np. rozwiązanie Reissnera–Nordströma (statyczna czarna dziura z ładunkiem elektrycznym), a przede wszystkim — czasoprzestrzeń płaskich fal grawitacyjnych. Warunku tego nie można więc stosować do rzeczywistego Wszechświata, nie jest to zatem zasadne kryterium selekcji czasoprzestrzeni.

Bezpiecznie jest więc odrzucić tylko czasoprzestrzenie z zamkniętymi liniami czasopodobnymi, a wszystkie pozostałe światy dopuszczane przez OTW są prawomocnymi kandydatami do opisu realnego Wszechświata.

3. CZAS A TEORIA KWANTÓW

Mimo że OTW jest teorią oddziaływania uniwersalnego — grawitacji — w swoim ujęciu czasu (i przestrzeni) jest osamotniona. Cała reszta fizyki traktuje czas jako parametr, względem którego mierzy się zmiany. Cała niegrawitacyjna fizyka jest w tym względzie bliższa newtonowskiej koncepcji czasu niż koncepcji geometrycznej. Naturalnie teoria fundamentalna, kwantowa teoria pola, jest relatywistyczna w sensie STW, czyli zmiana (inercjalnego) układu odniesienia powoduje zmianę czasu zgodnie z transformacją Lorentza, lecz ten zrelatywizowany do układu odniesienia czas też jest elementem absolutnym teorii, bowiem:

—każdy układ inercjalny obejmuje całą czasoprzestrzeń Minkowskiego,

—w każdym układzie czas płynie jednakowo w każdym miejscu, bowiem zegary wszędzie odmierzą ten sam czas własny, będąc względem siebie w spoczynku.

Pomijając zatem transformację Lorentza jako nieistotną, czas jest zewnętrznym parametrem dla wszystkich zjawisk w nieobecności grawitacji.

Teoria kwantów opiera się na tej koncepcji czasu jako zewnętrznego parametru, niezależnego od dynamiki. Wymaga tego interpretacja probabilistyczna mechaniki kwantowej oraz kwantowa teoria pomiaru. Dotyczy to nie tylko standardowej kopenhaskiej interpretacji teorii lecz również innych interpretacji, które są probabilistyczne, np. interpretacji zespołowej.

W mechanice kwantowej stan, czyli sytuacja fizyczna, w jakiej znajduje się dany obiekt kwantowy, np. elektron, opisany jest funkcją falową (zwaną obecnie częścią wektorem stanu). Funkcja falowa określa jedynie prawdopodobieństwo otrzymania danej wartości mierzonej wielkości fizycznej. W najprostszym eksperymencie: szukaniu elektronu w dostępnym mu obszarze przestrzeni, funkcja falowa podaje prawdopodobieństwo znalezienia go w danej chwili w pewnym miejscu. Elektron nie może być w dwu miejscach jednocześnie —

równoczesne pomiary mogą go wykryć tylko w jednym miejscu. Jeżeli szukam elektronu równocześnie w całej przestrzeni, to musi on gdzieś być, czyli prawdopodobieństwo znalezienia go gdziekolwiek jest równe 1; jest to warunek normalizacji funkcji falowej: w każdej chwili suma wszystkich prawdopodobieństw, czyli całka po całej przestrzeni z modułu kwadratu funkcji falowej musi równać się 1. Ten pomiar musi odbywać się równocześnie i wszędzie. Jeżeli szukam elektronu w jednej chwili w jednej połowie przestrzeni, a w godzinę później — w drugiej połowie, to mogę elektronu w ogóle nie znaleźć; jednoczesność jest więc kluczowa. Jest ona określona przez jednoznacznie wyróżniony czas fizyczny spośród wszystkich możliwych współrzędnych czasowych i czasów kosmicznych. Załóżmy bowiem, że elektron został zarejestrowany przez detektor w punkcie x czasoprzestrzeni. Ponieważ elektron po tym fakcie nie może być znaleziony gdzie indziej, akt pomiaru w x powoduje redukcję funkcji falowej (w tym przypadku zwaną w literaturze anglosaskiej „kolapsem funkcji falowej”): funkcja falowa momentalnie zbiega się do x , czyli natychmiastowo zanika we wszystkich punktach równoczesnych i późniejszych od x . Gdyby funkcja falowa zanikała nie natychmiastowo, lecz z pewną (dowolnie dużą) prędkością, to mielibyśmy sytuację, że po znalezieniu elektronu w x istnieje jeszcze różne od zera prawdopodobieństwo znalezienia go w punktach przestrzennie oddalonych lecz niewiele późniejszych od x ; byłoby to sprzeczne z zasadniczym postulatem mechaniki kwantowej, iż funkcja falowa opisuje stan jednej cząstki (np. elektronu), a nie roju oddzielnych cząstek. (Zbieganie się funkcji falowej do punktu, w którym detektor zarejestrował elektron, z nieskończoną prędkością, nie jest sprzeczne z teorią względności, bowiem funkcja ta propaguje się nie w fizycznej czasoprzestrzeni, lecz w tzw. „przestrzeni konfiguracyjnej”, gdzie nie obowiązują relatywistyczne ograniczenia prędkości.) Funkcja falowa zależy od czasu fizycznego i tylko jego „odczuwa”: on określa zdarzenia równoczesne z aktem pomiaru i późniejsze. Gdybyśmy zamiast tego czasu obowiązującego w mechanice kwantowej użyli jakiegoś matematycznie dopuszczalnego czasu kosmicznego, zbiory zdarzeń równoczesnych

według niego byłyby zupełnie inne. W zdarzeniach równoczesnych z punktem x według dowolnego czasu kosmicznego funkcja falowa jest na ogół różna od zera, co oznacza, że elektron może być równocześnie znaleziony w wielu miejscach!

Dalej, dla mechaniki kwantowej pojęciem fundamentalnym jest „zupełny układ przemiennych obserwabli”, czyli maksymalny zespół obserwowalnych (mierzalnych) wielkości fizycznych, reprezentowanych przez operatory, które między sobą komutują. Fizycznie oznacza to, że istnieją stany kwantowe, w których wielkości te mają określone wartości. Stany te są stanami własnymi wszystkich operatorów należących do zupełnego układu przemiennych obserwabli. Sens fizyczny opiera się na jednoczesnym pomiarze wszystkich obserwabli.

Zwracam uwagę, że pojęcie funkcji falowej nie jest lokalne, lecz globalne. Jeżeli funkcję falową podajemy jako funkcję współrzędnych elektronu (tzw. reprezentacja położeniowa wektora stanu), to dla wydobywania z niej fizycznie interesujących informacji musimy znać ją w całej przestrzeni; znajomość jej tylko w części przestrzeni jest bezużyteczna. Jeżeli swobodny elektron ma ściśle określony pęd (i energię), to jego funkcja falowa ma postać fali płaskiej rozpościerającej się po najdalsze galaktyki, mimo że stan ten został przygotowany w laboratorium na Ziemi i intuicyjnie spodziewamy się znaleźć ten elektron w jej pobliżu. To, czy jego funkcja falowa ma w pobliżu odległych galaktyk nadal kształt fali płaskiej z tą samą co tutaj amplitudą, ma wpływ na wynik wykonywanych w ziemskim laboratorium pomiarów. W sumie, każdy obiekt kwantowy jest przestrzennie nielokalny w sensie rozciągłości jego funkcji falowej na cały świat, a użycie tej funkcji falowej do przewidywania wyników pomiarów wymaga globalnego czasu, niezależnego od dynamiki układów kwantowych, mającego bezpośredni sens fizyczny, bowiem ma on jednoznacznie określać równoczesność zdarzeń. Jest to, jak widzieliśmy, niezgodne z naturą czasu w teorii grawitacji.

Wracamy do głównego tematu: usilnie poszukiwanej przez fizyków–teoretyków teorii kwantowej grawitacji. Z jednej strony, teoria ta jako kwantowa teoria pola (grawitacyjnego) wymaga uniwer-

salnego czasu jako zewnętrznego parametru odmierzającego ewolucję i od niej niezależnego, ale z drugiej strony w tym właśnie przypadku czas, jako aspekt grawitacji, jest zmienną dynamiczną, którą należy kwantować. Jeżeli jako punkt startu, czyli teorię klasyczną, którą podajemy procesowi kwantowania, bierzemy OTW — a nie mamy tu, jeżeli pominąć budzącą zastrzeżenia koncepcję strun jako fundamentalnych obiektów materii, większego wyboru — to czas, jakim ona operuje, nie nadaje się do potrzeb teorii kwantów.

Jako przykład weźmy warunek relatywistycznej kauzalności, wynikający z empirycznego faktu, iż żadne oddziaływanie w przyrodzie nie rozchodzi się szybciej od światła. W zwykłej kwantowej teorii pola (opartej na STW) zasadę kauzalności formułuje się następująco: jeżeli punkty x i y czasoprzestrzeni połączone są wektorem przestrzenniepodobnym, co geometrycznie oznacza, że y leży na zewnątrz stożka świetlnego przyszłości o wierzchołku w x , a fizycznie — że istnieje układ inercjalny, w którym oba zdarzenia są równoczesne, to wartość dowolnego pola fizycznego w x jest niezależna („kauzalnie niezwiązana”) od wartości tego pola w y . Jest to postulat dobrze uzasadniony, z którego trudno byłoby zrezygnować. W kwantowej grawitacji opartej na założeniu, że czasoprzestrzeń jest zakrzywiona, to, czy wektor łączący dwa zdarzenia jest przestrzenniepodobny, zależy od jej metryki. Metryka jest tu dynamicznym polem kwantowym, doznającym kwantowych fluktuacji, zatem długość wektora również fluktuuje i fluktuacje w chaotyczny sposób przekształcają wektor czasopodobny w przestrzenniepodobny i na odwrót. W rezultacie nie ma sensu mówić, że *na pewno* punkty te są położone względem siebie czasowo lub przestrzennie; można jedynie mówić o prawdopodobieństwie każdej z tych możliwości. Fizycy mówią, że kwantowa natura grawitacji rozmywa stożek świetlny, tak że nie wiadomo, czy dany punkt leży wewnątrz czy na zewnątrz niego. Efekt końcowy jest taki, że o żadnych dwu punktach czasoprzestrzeni nie można powiedzieć, że z pewnością są lub nie są kauzalnie związane, odpowiedź musi mieć charakter probabilistyczny.

Cała struktura matematyczna i konceptualna kwantowej teorii pola opiera się na założeniu, że chodzi o opis zjawisk fizycznych rozgrywających się na ustalonej arenie — płaskiej czasoprzestrzeni Minkowskiego. Arena ta, jest elementem absolutnym teorii, niewrażliwym na zachodzące na niej procesy. Składnikiem tej ustalonej areny jest czas. Nie potrafimy skonstruować teorii kwantów bez sztywnej areny i zewnętrznego czasu. W tym sensie mechanika kwantowa jest mniej doskonała niż ogólna teoria względności. Piękno OTW, którą wielu uważa za najdoskonalszą teorię fizyki, tkwi w tym, że ma ona niewiele elementów absolutnych, a w szczególności nie ma ustalonej areny. OTW nie jest teorią oddziaływań grawitacyjnych rozgrywających się na ustalonej arenie czasoprzestrzennej. Tu arena sama jest wielkością dynamiczną, aktywnie uczestniczącą w procesach, które się na niej rozgrywają. Dla grawitacji nie ma „tła”, czy też „czasoprzestrzeni odniesienia” (takiej jak dla innych zjawisk), względem której opisujemy ewolucję pola grawitacyjnego. Pole to, geometrycznie utożsamione z zakrzywioną czasoprzestrzenią, jest swoją własną areną. Pojawiające się od czasu do czasu próby opisanie grawitacji za pomocą pewnych obiektów żyjących w ustalonej czasoprzestrzeni (np. strun) należy uznać za krok wstecz w stosunku do teorii Einsteina.

Problem czasu w kwantowej grawitacji brzmi więc następująco: jak pogodzić fundamentalny brak sztywnej areny czasoprzestrzennej dla zjawisk fizycznych w OTW z potrzebą sztywnej areny w kwantowej teorii pola? Skąd wziąć uniwersalny i fizyczny czas konieczny do interpretacji probabilistycznej teorii kwantów, skoro klasyczna teoria grawitacji utrzymuje, że czegoś takiego nie ma? Co więcej, kwantowe fluktuacje metryki sprawiają, że nawet lokalny geometryczny czas (własny) jest trudny do określenia — fluktuacje zamazują różnicę między krzywymi czasopodobnymi i przestrzennopodobnymi i sens absolutny traci pojęcie odległości między dwoma punktami mierzone wzdłuż określonej linii. (Aby uniknąć nieporozumień: mówię tu o „konserwatywnym” spojrzeniu na kwantowanie grawitacji, w którym punkty (zdarzenia) i krzywe zachowują swój charakter jaki mają w teorii klasycznej, natomiast efekty kwantowe dotyczą tylko metryki, czyli

odległości. Inaczej mówiąc, punkty i krzywe nie zmieniają tożsamości, lecz fluktuacje metryki powodują, że tylko z pewnym prawdopodobieństwem można stwierdzić, czy konkretna linia jest czasopodobna, czy nie. Jak wspomniałem wcześniej, niektórzy badacze zasadnie argumentują, że efekty kwantowe mogą zaburzyć same punkty, wówczas pojęcie krzywych straci dotychczasowy sens.) Wygląda na to, że przy kwantowaniu grawitacji pojęcie czasu ulega dalszemu istotnemu osłabieniu, tak że nie ma on prawie nic wspólnego z czasem koniecznym w fizyce kwantowej, oraz że (lokalne) rozdzielanie czasoprzestrzeni na czas i przestrzeń ma charakter klasyczny i do teorii w pełni kwantowej przenosi się tylko w pewnym probabilistycznym sensie. Lecz w takim razie co kwantowa grawitacja ma wspólnego z mechaniką kwantową — taką jak ją rozumiemy obecnie?

Jeszcze raz muszę podkreślić, że probabilistyczna interpretacja mechaniki kwantowej jest bardzo restrykcyjna w odniesieniu do czasoprzestrzeni. Załóżmy, że interesuje nas cel mniej ambitny od kwantowej teorii grawitacji: chcemy podać kwantowomechaniczny opis pewnego pola, np. elektromagnetycznego, w obecności klasycznego ustalonego pola grawitacyjnego, na które to pole kwantowe nie ma wpływu. Fizycznie brzmi to bardzo sensownie: rozpatrujemy np. czasoprzestrzeń czarnej dziury o masie gwiazdowej i wiązkę światła. Pole grawitacyjne czarnej dziury jest silne i wpływa na własności klasyczne i kwantowe fotonów, natomiast siły grawitacyjne fotonów są słabe i nie wywierają wpływu na czarną dziurę, zatem grawitacja jest zafiksowana i tworzy zakrzywioną — lecz sztywną — arenę dla zjawisk kwantowych. Taką teorię próbowano skonstruować od połowy lat siedemdziesiątych XX wieku, nosi ona nazwę kwantowej teorii pola w czasoprzestrzeni zakrzywionej. Wszelką materię traktujemy kwantowo, natomiast pole grawitacyjne jest klasyczne i ustalone z góry (jako pewne rozwiązanie próżniowych równań Einsteina). Wyniki są równie zaskakujące co niezachęcające. Są głównie negatywne. Okazuje się, że na ustaloną czasoprzestrzeń, np. czarnej dziury, nie da się przenieść większości pojęć i wyników zwykłej kwantowej teorii pola. Trudności te sprawiły, że szukana teoria istnieje w postaci szczątko-

wej. Wystarczą dwa przykłady trudności, jakie napotkano. W kwantowej teorii pola fundamentalne jest pojęcie stanu kwantowej próżni, który jest jednoznacznie wyróżniony jako stan kwantowy o najniższej energii i zarazem stan, w którym nie ma cząstek określonego rodzaju. A czym jest kwantowa cząstka? Matematycznie opisuje się ją jako pewne rozwiązanie równania falowego (równania dynamiczne w relatywistycznej teorii kwantów mają zwykle postać pewnych równań falowych, analogicznych do równań dla fal elektromagnetycznych i akustycznych) niosące dodatnią energię (rozwiązania o ujemnej energii reprezentują antycząstki). Okazało się, że w polu grawitacyjnym koncepcja stanu próżni oraz cząstki kwantowej są albo zależne od wyboru obserwatora (układu odniesienia), co jest oczywiście niedopuszczalne, albo w ogóle tracą sens. Te kłopoty kwantowej teorii pola w zakrzywionej czasoprzestrzeni stanowią bez wątpienia przedsmak tego, co czeka nas w pełnej kwantowej teorii grawitacji.

Z powyższego widać, że problemu czasu w kwantowej grawitacji nie rozwiąże bynajmniej ograniczenie się w OTW do czasoprzestrzeni bez zamkniętych linii świata i takich, w których istnieje czas kosmiczny. Kłopoty z teorią kwantów zaczynają się, gdy tylko wyjdziemy poza czasoprzestrzeń Minkowskiego; koncepcji kwantowych nie potrafimy rozwijać bez inercjalnego układu odniesienia wyposażonego we współrzędne kartezjańskie pokrywające całą (płaską) czasoprzestrzeń.

Nie jest to koniec trudności prześladowających fizyków zmagających się z kwantową grawitacją. Największych kłopotów dostarcza im kosmologia kwantowa; tu też zapewne dojdzie do najbardziej radykalnej przemiany pojęć w fizyce. OTW jest teorią nielokalną w tym sensie, że opisuje nie tylko pole grawitacyjne w obszarze wokół ciał wytwarzających duże siły ciążenia; opisuje też Wszechświat jako całość, przypisując mu pewną czasoprzestrzeń z metryką spełniającą równania Einsteina dla kosmicznego rozmieszczenia materii. OTW staje się wówczas kosmologią relatywistyczną. Przez analogię spodziewamy się, że kwantowa teoria grawitacji powinna obejmować też kosmologię kwantową, traktującą cały Wszechświat jako specyficzny grawitujący obiekt

kwantowy. Ma to sens, bowiem teoria kwantów stosuje się nie tylko do obiektów mikroskopowych (piszę o tym dalej), lecz wówczas trudności konceptualne stają się wręcz przerażające. W kosmologii kwantowej wprowadza się funkcję falową dla całego Wszechświata i można na niej formalnie wykonywać takie operacje jak na funkcjach falowych ciał mikroskopowych, lecz jej sens fizyczny jest niejasny. 1) Znika fundamentalny dla mechaniki kwantowej podział na układ kwantowy i obserwatora (tzn. klasyczny przyrząd pomiarowy), bowiem wszystko co istnieje, wchodzi w skład Wszechświata, czyli układu kwantowego. Nie ma zewnętrznego obserwatora, który wyniki pomiarów wykonanych na badanym układzie interpretuje w terminach fizyki klasycznej. 2) Wątpliwa jest interpretacja probabilistyczna tej funkcji falowej. W fizyce danemu wynikowi pomiaru przypisuje się prawdopodobieństwo w ten sposób, że równe jest ono względnej częstotliwości (ułamkowi) pojawiania się tego wyniku w pomiarze wykonanym na zespole statystycznym identycznych obiektów. Wszechświat jest jeden, więc nawet konceptualnie nie można skonstruować zespołu statystycznego złożonego z miliona identycznych Wszechświatów i na nim wykonywać pomiary. W zwykłej mechanice kwantowej pomiarowi wykonanemu na zespole statystycznym równoważny jest pomiar zrobiony na jednym egzemplarzu obiektu kwantowego, lecz powtórzony wielokrotnie. Zamiast więc wykonywać milion takich samych pomiarów na milionie elektronów, z których każdy jest w tym samym stanie, można posłużyć się jednym tylko elektronem, na którym kolejno wykonuje się milion pomiarów, z tym, że za każdym razem należy go uprzednio wprowadzić w ten sam stan kwantowy. Do tego jednak potrzebny jest zewnętrzny obserwator, który za pomocą otoczenia wprowadzi ten elektron wielokrotnie w ten sam badany stan. Gdy obserwator i przyrząd pomiarowy stanowią część badanego obiektu, pomiar zmienia stan i „z wnętrza” nie można pierwotnego stanu odtworzyć. Pomiary na Wszechświecie są niepowtarzalne. Co zatem empirycznie miałyby oznaczać przewidywanie kwantowej kosmologii, że z prawdopodobieństwem 0,93 ten fragment artykułu napisałem 8 września 2000 r.?

3) Znika równie fundamentalne rozróżnienie między oddziaływaniem

w obrębie układu kwantowego, przy którym stan układu (funkcja falowa) ewoluuje deterministycznie zgodnie z równaniem Schrödingera (lub innym kwantowym równaniem ewolucji), a pomiarem wykonanym przez obserwatora na układzie. Pomiar — wykonany przyrządem klasycznym — wprowadza niekontrolowaną przez dynamikę kwantową (tj. przez równanie Schrödingera) zmianę stanu. W standardowej interpretacji kopenhaskiej mechaniki kwantowej pomiar wywołuje redukcję funkcji falowej: oddziaływanie z przyrządem sprawia, że funkcja falowa zostaje w sposób losowy wtrącona („redukuje się”) w jeden z dostępnych wektorów własnych mierzonej obserwabli — ten, który odpowiada otrzymanej w pomiarze wartości tej obserwabli (np. w podanym wcześniej przykładzie zarejestrowanie elektronu w pewnym punkcie przestrzeni redukuje jego funkcję falową do funkcji własnej operatora położenia przedstawiającej elektron zlokalizowany w tym punkcie przestrzeni). Nie wiadomo zatem, czy i kiedy zachodzi redukcja funkcji falowej Wszechświata do odpowiedniego wektora własnego mierzonej obserwabli. 4) Brak zewnętrznego czasu powoduje, że funkcja falowa Wszechświata nie ewoluuje, lecz opisuje stan całej czasoprzestrzeni, czyli przeszłości, teraźniejszości i przyszłości. W równaniu określającym ewolucję funkcji falowej Wszechświata, równaniu Wheelera–DeWitta, w ogóle nie występuje zmienna przypominająca czas; równanie to tylko przez analogię można nazwać równaniem ewolucyjnym, bowiem nie mówi ono o zmianie funkcji falowej w czasie, lecz w inny sposób tę funkcję determinuje.

Wszechświat jest jeden, więc kosmologia kwantowa winna być teorią, która przewiduje jedyny i jednoznaczny stan kwantowy — ten, który się realizuje. Teoria ta ma być zatem całkowicie odmienna od wszystkich pozostałych teorii fizyki, ma bowiem dopuszczać tylko jedno rozwiązanie swoich równań dynamicznych, gdy pozostałe teorie mają nieskończony zbiór rozwiązań, z którego w odpowiedni sposób (za pomocą danych początkowych, brzegowych itd.) wybiera się rozwiązanie adekwatne do konkretnej sytuacji fizycznej. W kosmologii kwantowej jest tylko jedna sytuacja i jeden stan przez nią przewidywany. Dodajmy jeszcze jeden problem (który może się wydać

drobnością w porównaniu z poprzednimi): nie wiadomo jak ten hipotetyczny stan kwantowy ma dawać klasyczny Wszechświat taki, jaki widzimy — od Wielkiego Wybuchu, poprzez ewolucję inflacyjną, aż do obecnego rozbiegającego się rojowiska galaktyk.

Ktoś mógłby przytomnie zarzucić, że powyższe nagromadzenie konceptualnych problemów (nie wspominając o trudnościach czysto matematycznych) kosmologii kwantowej świadczy o tym, że jest to teoria, której być nie może, byłaby bowiem sprzeczna albo z kwantową, albo z grawitacyjną naturą materii, a w konsekwencji również teoria w stosunku do niej nadrzędna — teoria kwantowej grawitacji — byłaby wewnętrznie niespójna, czyli niefizyczna.

Zarzutu tego nie da się odeprzeć w sposób definitywny. Jest faktem, że eksperymentalnie nie natrafiliśmy na najślabszy choćby ślad efektów kwantowej grawitacji i teorię tych hipotetycznych zjawisk budujemy tylko ze względu na spójność fizycznej natury Przyrody: nie do przyjęcia jest myśl, że wszelka materia jest kwantowa i jej oddziaływania są kwantowe z jednym wyjątkiem — oddziaływania najbardziej powszechnego, grawitacji. Poczulibyśmy się znacznie pewniej, gdybyśmy mieli wskazówki empiryczne, np. pewne niezgodności obserwacji z klasyczną teorią grawitacji, sugerujące obecność efektów kwantowych, lub sygnały negatywne — nieobecność takich efektów tam, gdzie ich oczekujemy. Niestety na takie wskazówki nie możemy prędko liczyć. Jak powiedziałem na wstępie, nie potrafimy wymyślić efektów kwantowej grawitacji w obrębie zjawisk, które są nam obecnie dostępne lub będą dostępne w niedalekiej przyszłości; powszechnie uważa się, że kwantowa grawitacja ujawnia się tam, gdzie jeszcze długo zajrzeć nie będziemy mogli.

Obecnie możemy mówić tylko o trendach badawczych. W latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych uważano powszechnie, że konceptualne fundamenty mechaniki kwantowej zostały ostatecznie zbudowane i nic już do nich dorzucić (lub odjąć) nie można; teoria rozwijała się w zakresie zastosowań: do fizyki atomowej i fazy skondensowanej, fizyki jądrowej i cząstek elementarnych (kwantowa teoria pola). Dominowała ortodoksyjna kopenhaska interpretacja mechaniki kwanto-

wej; oprócz niej powstało kilka innych interpretacji probabilistycznych, traktowanych raczej jako ciekawostki niż poważne konkurentki interpretacji bohrowskiej. Jeżeli ktoś twierdził, że czegoś w interpretacji kopenhaskiej nie rozumie, to był to jego prywatny — a nie obiektywny — problem. Z kolei OTW miała opinię teorii pięknej matematycznie, lecz skomplikowanej i przez to trudno zrozumiałej, a przede wszystkim mało praktycznej, bo stosującej się do zjawisk egzotycznych. W następnych dziesięcioleciach OTW coraz szerzej wkraczała w rozmaite dziedziny badań i obecnie fizyk cząstek elementarnych na pewno nie powie, że grawitacja to zjawisko życia codziennego, które nie ma wpływu na jego praktykę badawczą. (W 1987 r., w głośnym wykładzie sławny Steven Weinberg uznał OTW za jeden z filarów fizyki cząstek elementarnych.) Ogromnie wzrosło zarówno zrozumienie OTW, jak i liczba ludzi prawidłowo ją rozumiejących; nie uważa się jej za aż tak trudną, skomplikowaną i niezrozumiałą jak kiedyś, a bardziej dostrzega się ogromne bogactwo wewnętrzne tej teorii. Jednocześnie coraz więcej ludzi zaczęło dostrzegać, że w trudnościach ze zrozumieniem conceptualnych podstaw mechaniki kwantowej tkwi rzeczywisty, a nie tylko psychologiczny problem. Rozgłosu nabrała śmiała hipoteza Rogera Penrose'a, (spopularyzowana w jego sławnej książce *Nowy umysł cesarza*), że redukcja funkcji falowej wywołana pomiarem jest w rzeczywistości spowodowana przez grawitację. Spór o sens teorii kwantów stał się ponownie, w ponad pół wieku po słynnych dyskusjach Einsteina z Bohrem, poważną debatą naukową.

Żeby nie było nieporozumień: mechanika kwantowa jest poprawną teorią fizyczną, potwierdzoną w niezliczonych doświadczeniach. Wszędzie tam, gdzie daje ilościowe przewidywania, zgadza się z eksperymentem i nie ma żadnej szansy, by można ją było zakwestionować i wrócić do „starej dobrej” fizyki klasycznej. W ogniu krytyki jest tylko jej interpretacja kopenhaska, czyli kwestie, które nie podlegają weryfikacji doświadczalnej. Zarzutów jest parę. Interpretacja kopenhaska jest stosowana tylko do nierelatywistycznej mechaniki kwantowej jednej lub wielu cząstek; nie stosuje się jej do najbardziej rozwiniętego działu teorii kwantów — kwantowej teorii

poła. Jak wspomniałem, pojęciem fundamentalnym w tej ostatniej jest kwantowy stan próżni pewnego pola kwantowego; za jego pomocą definiuje się cząstki elementarne jako kwanty tego pola i ustala ich własności. Teoria pola kwantowego jest probabilistyczna w tym sensie, że przewiduje jedynie prawdopodobieństwo otrzymania jakiegoś efektu w danym procesie, np. prawdopodobieństwo wykreowania pary elektron–pozyton w zderzeniu kwantu gamma z elektronem. Nikt natomiast nie bada własności kwantowej próżni wykonując pomiary na zespole statystycznym złożonym z wielu egzemplarzy tej próżni (jest to niewykonalne). Po drugie i co istotniejsze, mechanika kwantowa przez swoją nielokalność jest nieseparowalna. Kwantowa cząstka swobodna, ściśle izolowana od reszty Wszechświata, jest idealizacją trudną do zrealizowania. Funkcja falowa każdej cząstki rozciąga się w rozległym obszarze przestrzeni, co powoduje, że funkcje falowe różnych cząstek nakrywają się, zatem cząstki te oddziałują ze sobą. Oddziaływania te są bardzo słabe i w praktyce laboratoryjnej można je śmiało zaniedbać, lecz one istnieją i sprawiają, że zachodzi „kwantowe splatanie stanów”. Fundamentalny dla fizyki klasycznej i interpretacji kopenhaskiej dualistyczny podział: badany układ–otoczenie, jest tylko przybliżeniem rzeczywistości; przypisanie badanemu elektronowi stanu opisanego jednocząstkową funkcją falową jest takim przybliżeniem, bowiem faktycznie mamy do czynienia ze stanem układu wielu elektronów i innych cząstek, a my zwracamy uwagę jedynie na jeden składnik tego układu. Oczywiście przybliżenie to jest zwykle zadowalające (w eksperymencie nie ma śladu obecności pozostałych cząstek układu kwantowego), nie wolno jednak utożsamiać wielkości przybliżonej z dokładną. Kwantowe splatanie stanów jest właśnie odpowiedzialne za takie zdumiewające efekty, jak np. paradoks Einsteina–Podolskiego–Rosena.

Dalej, z tych względów główna idea Bohra: podział na obiekt kwantowy i przyrząd klasyczny (i obserwatora) jest niezadowalająca. Opisuje ona trafnie praktykę fizyki doświadczalnej, lecz jako bazowy opis przyrody jest bezpodstawna. Nie istnieje nic takiego jak przyrząd klasyczny: składa się on z atomów i cząstek elementarnych, czyli

obiektów czysto kwantowych. Opis fundamentalny winien być sformułowany wyłącznie za pomocą pojęć kwantowych i winien być spójny i samowystarczalny; dopiero dla pewnych specyficznych agregatów obiektów kwantowych ich stan kwantowy winien przechodzić w stan klasyczny. „Klasyczność” nie jest bytem niezależnym od „kwantowości”, lecz jego pochodną. Takiego czysto kwantowego opisu materii, nie odwołującego się do pojęć klasycznych, mimo wielu prób, nie udało się stworzyć.

Dorzućmy tu jeszcze jeden element krytyki, mający bardziej charakter heurystyczny. We wszystkich teoriach fizyki poza mechaniką kwantową, interpretacja teorii (czyli wskazanie co teoria przewiduje, co jest mierzalne, a co jest elementem nieweryfikowalnym doświadczalnie) jest inherentnym składnikiem teorii, którego nie można zmienić bez naruszenia jej spójności. W mechanice kwantowej interpretacja została nałożona na teorię dynamiczną i sam fakt, że istnieje kilka interpretacji, świadczy, że tu związek interpretacji z dynamiką jest luźniejszy niż w pozostałych teoriach. To również skłania do przemyślenia podstaw teorii kwantów.

Badania ostatniej ćwierci XX wieku nie przyniosły tu znaczącego postępu, raczej przekonały o istnieniu trudnego problemu i wskazały na konieczność uwzględnienia grawitacji. Skoro teoria kwantów jest nieseparowalna, to każde wyznaczenie granic układu kwantowego, oddzielających go od reszty Wszechświata (też złożonego z układów kwantowych), jest tylko przybliżeniem mającym sens w konkretnej sytuacji. W istocie nie ma wielu odrębnych układów kwantowych, lecz istnieje tylko jeden układ, który już nie ma otoczenia — cały Wszechświat. Mechanika kwantowa tak naprawdę stosuje się nie do pojedynczych elektronów, atomów czy molekuł, jak sądzono przez ponad pół wieku, ale do całego Wszechświata. Prawdziwym rdzeniem teorii kwantów jest więc kosmologia kwantowa. M. Gell-Mann i J. Hartle napisali w 1990 r.: „Najlepiej i najpełniej można zrozumieć mechanikę kwantową za pomocą kosmologii kwantowej”. Brzmi to jak absurd, lecz jest bardzo rozsądne. Wszystkie próby zadowalającego sformułowania podstaw teorii kwantów w oparciu o mechanikę kwantową ato-

mów i molekuł zawiodły, pozostało zatem rozwiązywanie problemu za pomocą fizyki kwantowej całego Wszechświata. Niestety i tutaj nie otrzymano, jak dotąd, pożądanego wyniku, przypuszczalnie dlatego, że nie potrafimy wydostać się z kręgu tradycyjnych pojęć i koncepcji. W każdym razie zasadnym jest uznać kosmologię kwantową, a wraz z nią i kwantową grawitację, za pełnoprawny dział fizyki.

W ten sposób wróciliśmy do tytułowej kwestii. Koncepcja fizycznego czasu, która doznała w pierwszej połowie XX wieku głębokiej modyfikacji za sprawą szczególnej i ogólnej teorii względności, stała pod koniec tego stulecia wobec konieczności poddania się jeszcze poważniejszej przemianie. Nie wiemy w jaką stronę pójść zmiany, jakie własności czasu, do których już przyzwyczailiśmy się, znikną w ich wyniku, a jakie nowe, zaskakujące cechy pojawią się. Można tylko przypuszczać, że wbrew bardzo optymistycznym wypowiedziom niektórych badaczy (kierowanym najczęściej do szerokiej publiczności), radykalna przemiana nastąpi nie na samym początku, lecz raczej w głębi trzeciego tysiąclecia.