

Brian Greene

Struktura kosmosu  
Przestrzeń, czas i struktura rzeczywistości

Prószński i S-ka, 2005

## **OPIS KSIĄŻKI**

tekst znajduje się na stronie [http://jacek.kwasniewski.eu/strona\\_recenzje\\_1.html](http://jacek.kwasniewski.eu/strona_recenzje_1.html)

Zaprezentowany opis książki jest połączeniem wyciągu z tekstu oryginalnego i streszczenia własnego.

# SPIS TREŚCI

## Część I Arena rzeczywistości

1. Drogi do rzeczywistości. Przestrzeń. Czas. I dlaczego rzeczy są takie jakie są?  
*Plan książki: fizyka klasyczna, Einstein, teoria kwantowa, kosmologia, superstruny* . . . . . 2
2. Wszechświat i wiadro. Czy przestrzeń jest pojęciem abstrakcyjnym czy wielkością fizyczną?  
*Rozdział opisujący przestrzeń i ruch w fizyce klasycznej* . . . . . 3
3. Względność i absolut. Czy czasoprzestrzeń jest stworzonym przez Einsteina pojęciem abstrakcyjnym, czy bytem fizycznym?  
*Rozdział o przestrzeni, czasie i grawitacji w teorii względności* . . . . . 4
4. Splątanie przestrzeni. Co w kwantowym świecie oznacza rozdzielanie przestrzenne ciał?  
*Rozdział o mechanice kwantowej, nieoznaczoności i splątaniu kwantowym* . . . . . 6

## Część II Czas i doświadczenie

5. Zamarznięta rzeka. Czy czas płynie?  
*Rozdział o czasie w teorii względności* . . . . . 11
6. Przypadek i strzałka. Czy czas ma kierunek?  
*Rozdział o kierunku upływu czasu. Strzałka czasu i entropia* . . . . . 11
7. Czas i kwanty. Spojrzenie na naturę czasu z perspektywy świata kwantów  
*Rozdział o paradoksach czasu w mechanice kwantowej* . . . . . 14

## Część III Czasoprzestrzeń i kosmologia

8. Płatki śniegu i czasoprzestrzeń. Symetria i ewolucja kosmosu  
*Rozdział o wieku i kształcie Wszechświata. Czas w rozszerzającym Wszechświecie* . . . . . 18
9. Parowanie próżni. Ciepło, nicłość i unifikacja  
*Rozdział o ewolucji Wszechświata. Ocean Higgsa i powstanie masy. Unifikacja sił* . . . . . 20
10. Dekonstrukcja Wielkiego Wybuchu. Co wybuchło?  
*Rozdział o kosmologii inflacyjnej. Analiza Wielkiego Wybuchu. Część I* . . . . . 21
11. Kwanty na niebie. Inflacja, fluktuacje kwantowe i strzałka czasu  
*Rozdział o kosmologii inflacyjnej. Analiza Wielkiego Wybuchu. Część II* . . . . . 24

## Część IV Początki i unifikacja

12. Świat na strunie. Struktura kosmosu według teorii strun  
*Rozdział o tym jak połączyć mechanikę kwantową i ogólną teorię względności* . . . . . 27
13. Wszechświat na branie. Spekulacje na temat przestrzeni i czasu w M-teorii  
*Rozdział o drugiej rewolucji superstrun, kosmologii opartej na scenariuszu bran* . . . . . 30

## Część V Rzeczywistość i wyobrażenia

14. W niebiosach i na ziemi. Doświadczenia z przestrzenią i czasem  
*Rozdział o planowanych eksperymentach weryfikujących nowe teorie* . . . . . 33
15. Teleportacja i wehikuły czasu. Podróże w przestrzeni i w czasie  
*Mechanizmy teleportacji oraz techniki i paradoksy podróży w czasie* . . . . . 34
16. Spojrzenie w przyszłość. Perspektywy przestrzeni i czasu  
*Czy czasoprzestrzeń nie jest epifenomenem czegoś bardziej fundamentalnego?* . . . . . 35

## Arena rzeczywistości

### 1 Drogi do rzeczywistości. Przestrzeń. Czas. I dlaczego rzeczy są takie jakie są?

#### 1.1 Wstęp

#### 1.2 Rzeczywistość klasyczna

Newton: formułując prawa ruchu powstaje pytanie, co jest obszarem, w którym zachodzi ruch. Odpowiedź intuicyjna: przestrzeń. Ale co to jest przestrzeń? Newton: czas i przestrzeń są to absolutne i niezmiennie byty stanowiące dla Wszechświata sztywną, niezmienną arenę wydarzeń. Przestrzeń i czas to niewidzialne rusztowanie nadające Wszechświatowi kształt i strukturę.

#### 1.3 Rzeczywistość relatywistyczna

Lata 60. XIX wieku: James Clark Maxwell rozszerzył zakres fizyki klasycznej o elektryczność i magnetyzm. Koniec XIX wieku – optymizm co do rychłego zakończenia kompletnego opisu świata (Michelson, Kelvin). Ale początek XX wieku – rewolucja einsteinowska. 1905: czas i przestrzeń nie są niezależne i absolutne, ale splecione i względne. 1915: ponownie sformułowane prawa grawitacji. Czas i przestrzeń zakrzywiają się i uczestniczą w ewolucji kosmosu. Są giętkie i dynamiczne.

#### 1.4 Rzeczywistość kwantowa

Podstawa fizyki klasycznej: jeśli znamy położenia i prędkości ciał w określonym momencie możemy wyznaczyć ich położenia i prędkości w dowolnym momencie przeszłości i przyszłości. Taki pogląd podziela szczególna i ogólna teoria względności. Z kolei teoria kwantowa, choć niezwykle użyteczna przy analizie wielu zagadek rzeczywistości subatomowej, stwierdza, że możemy wyliczyć tylko prawdopodobieństwa własności ciał w ich przeszłości i przyszłości. Ciała poruszają się we „mgłę prawdopodobieństwa” i stają się określone dopiero, gdy obserwacja zmusi je do odrzucenia możliwości kwantowych i zdecydowania się na ustalony wynik. Tego wyniku nie możemy przewidzieć, możemy jedynie określić szanse jego pojawienia się. W efekcie dyskusji Einsteina z teorią kwantową ukazano też inną „kwantową” cechę rzeczywistości, tzw. splątanie kwantowe. Ciała oddalone od siebie na dowolną (!) odległość mogą w pewnych okolicznościach stanowić jedność i zachowywać się w sposób skoordynowany, jednolity.

#### 1.5 Rzeczywistość kosmologiczna

Jedną z najtrudniejszych zagadek współczesnej fizyki jest strzałka czasu (tę nazwę wymyślił fizyk Arthur Eddington w 1928 roku). Istnieje kierunek w czasie, tzw. asymetria czasu – od przeszłości do przyszłości a nie obserwujemy symetrycznego kierunku odwrotnego – od przyszłości do przeszłości. Skąd się wzięła ta asymetria? Jest to tajemnica, bo prawa fizyki jej nie wykazują, każdy kierunek w czasie jest dla nich równoprawny. Dlaczego więc ciągle doświadczamy asymetrii czasu jest dla nas tak oczywiste i stanowi podstawą naszej orientacji w świecie? Wyjaśnienie musi sięgać do początku Wszechświata. Szczególne warunki wówczas panujące mogły wymusić kierunek upływu czasu. Kosmologie, czyli koncepcje jak powstał Wszechświat istnieją od tysięcy lat, ale dopiero ogólna teoria względności (OTW) zapoczątkowała współczesną kosmologię naukową. OTW została zastosowana do analizy całego Wszechświata i dzięki temu powstała teoria Wielkiego Wybuchu (TWW). W połowie lat 60. XX wieku wykryto przewidzianą w tej teorii jednorodną mgłą promieniowania mikrofalowego. Był to sukces teorii Wielkiego Wybuchu. Ale TWW nie wyjaśnia skąd przestrzeń ma taki kształt, dlaczego temperatura

promieniowania mikrofalowego jest wszędzie taka sama itd. Przełomem było powstanie kosmologii inflacyjnej, która modyfikuje teorię Wielkiego Wybuchu, dodając - na samym początku istnienia Wszechświata - bardzo krótki okres szybkiej ekspansji kosmosu (w czasie  $10^{-33}$  sekundy Wszechświat powiększył się co najmniej o współczynnik  $10^{33}$ ). Problem kosmologii inflacyjnej – teoria ta opiera się na ogólnej teorii względności (OTW), ale Wszechświat w okresie swego początku ma wielkość subatomową i wymaga zastosowania teorii kwantowej. Ale równań tej teorii nie daje się pogodzić z równaniami ogólnej teorii względności. Nie daje się więc w pełni opisać początku Wszechświata. Należy stworzyć teorię zunifikowaną.

#### 1.6 Rzeczywistość zunifikowana

Einstein chciał stworzyć zunifikowaną teorię, ale był samotny w tych poszukiwaniach. Nie powiodło mu się. Teraz zadanie to uznawane jest za najważniejsze w fizyce. Ogólna teoria względności (OTW) stosuje się do dużych wymiarów, kwantowa – do małych. Jednoczesne ich zastosowanie daje odpowiedzi bezsensowne, np. prawdopodobieństwo =  $\infty$ . Przez dekady panował między tymi teoriami rozjem, ale analiza Wszechświata u jego początków (obiekty masywne i małe) wymaga równoczesnego zastosowania obu teorii. Najlepszym przykładem są czarne dziury (gwiazda pod własnym ciężarem zapada się do rozmiaru punktu). Propozycją unifikacji jest teoria superstrun. Według niej najmniejsze cząstki materii zbudowane z maleńkich, drgających włókien energii. Wibracje tworzą różne własności cząstek. Teoria superstrun godzi OTW i mechanikę kwantową, ale wymaga istnienia 9 wymiarów przestrzennych i jednego czasowego. Jej rozwinięciem jest M-teoria, która wymaga istnienia 10 wymiarów przestrzennych. Wymiary dodatkowe są za małe, aby je dostrzec. Jedną z konsekwencji teorii superstrun jest hipoteza istnienia Wszechświatów równoległych.

#### 1.7 Rzeczywistość przeszła i przyszła

#### 1.8 Dorastając w czasie i przestrzeni

## 2 **Wszechświat i wiadro. Czy przestrzeń jest pojęciem abstrakcyjnym czy wielkością fizyczną?**

#### 2.1 Wstęp

Eksperyment Newtona z wiadrem: wiadro z wodą zawieszamy na sznurze, sznur skręcamy i puszczone wiadro wprawiając je w ruch obrotowy. Po chwili woda w wiadrze zaczyna wirować i jej poziom na brzegach jest wyższy niż w środku. Ten eksperyment badający ruch był analizowany przez ponad 300 lat.

#### 2.2 Pojęcie względności przed Einsteinem

Pytanie Newtona: jeśli mówimy o ciele, że jest nieruchome lub porusza się ze stałą prędkością, to z czyjego punktu widzenia? Jeśli następuje zmiana prędkości to względem czego?

#### 2.3 Wiadro

Dlaczego woda w wirującym wiadrze przyjmuje taki kształt? Odpowiedź Newtona: punktem odniesienia dla opisu ruchu jest absolutna przestrzeń. Ciało się porusza względem przestrzeni absolutnej. Ciało przyspiesza też względem przestrzeni absolutnej. Newton nie zajmował się jednak zbyt wiele definiowaniem przestrzeni. Stwierdził: „Przeźródła absolutna, w swojej istocie, bez odniesienia do czegokolwiek zewnętrznego, pozostaje zawsze niezmienna i nieruchoma”.

#### 2.4 Przestrzenny kłopot

Próby uporania się ze zrozumieniem czym jest przestrzeń datują się od

starożytności. Czy przestrzeń różni się od materii? Czy przestrzeń istnieje niezależnie od obecności ciał materialnych? Czy jest skończona? Zasadnicze pytanie: czy przestrzeń jest bytem materialnym, niezależnym, czy pojęciem umysłu służącym do opisu związku między ciałami materialnymi? Leibniz: przestrzeń to pojęcie. Gdyby usunąć ciała, nie byłoby przestrzeni. W dyskusji zastosował argumenty teologiczne. Newton: przestrzeń absolutna istnieje, bo choć trudna do wykrycia bezpośredniego, wywołuje obserwowalne skutki: np. przyspieszenia w wirującym wiadrze. W ten sposób przeniósł dyskusję z filozofii i teologii do weryfikowalnych naukowo danych. I to stanowisko zostało zaaprobowane przez kilka następnych wieków.

#### 2.5 Mach i znaczenie przestrzeni

Pojęcie przestrzeni absolutnej (PA) wyjaśnia ruch przyspieszony ale nie ze stałą prędkością. Bez ciał orientacyjnych nie wiemy gdzie jesteśmy w PA. Ale... dlaczego Newton badając ruch wody w wiadrze nie rozważył innych punktów odniesienia dla ruchu? Laboratorium, w którym jest wiadro, budynków wokół niego albo ziemi pod stopami? Zdaniem Macha ruch względny wody być może można tłumaczyć tymi innymi punktami odniesienia eliminując konieczność wprowadzenia PA? Według niego w pustym wszechświecie nie ma rozróżnienia między wirowaniem i brakiem wirowania. Całkowity bezruch i jednorodne wirowanie są nierozróżnialne.

#### 2.6 Mach, ruch i gwiazdy

Według Macha siła odczuwana w wyniku wirowania jest proporcjonalna do ilości całej materii we Wszechświecie. Przyspieszenie odczuwamy tylko względem średniego rozkładu innych ciał materialnych w kosmosie. Czyli, im więcej jest materii, tym większą siłę odczuwamy. Przestrzeń Macha jest podobna do leibnitzowskiej: bez ciał nie istnieje.

#### 2.7 Mach kontra Newton

### 3 **Względność i absolut. Czy czasoprzestrzeń jest stworzonym przez Einsteina pojęciem abstrakcyjnym, czy bytem fizycznym?**

#### 3.1 Wstęp

Dzięki Einsteinowi przestano pytać o sposób istnienia przestrzeni a zaczęto pytać o czasoprzestrzeń: czy czasoprzestrzeń istnieje fizycznie?

#### 3.2 Czy pusta przestrzeń jest pusta?

Einstein pisząc o świetle korzystał z prac Maxwella, który sformułował cztery równania nt. elektryczności i magnetyzmu. Maxwell korzystał z dokonań Faradaya, który wprowadził pojęcie pola. Pole przenika i wypełnia przestrzeń. Maxwell wykazał, że pola magnetyczne i elektryczne są ze sobą splątane. Stoi za nimi jedna siła. Nazwał ją polem elektromagnetycznym. Analizując swe równania odkrył, że zmiany w polach rozchodzą się z prędkością światła. Ale prędkość ta była w jego równaniach niepowiązana z żadnym punktem odniesienia. Fizycy przyjęli, że ośrodkiem względem którego światło się przemieszcza (szybkość światła 300 tys. km/sek.) jest nieruchomy eter. Jest uderzające podobieństwo między nim a przestrzenią absolutną Newtona. Było wiele prób zbadania natury eteru i jego właściwości. Okazało się, że światło ma tę samą prędkość i gdy mierzymy, jak się do nas zbliża jak i gdy „ucieka”. Jak to wyjaśnić?

#### 3.3 Względna przestrzeń, względny czas

W roku 1905 Einstein w pracy „O elektrodynamice ciał w ruchu” stwierdził, że eteru nie ma a światło nie potrzebuje ośrodka, który by je przynosił. Może się

przemieszczać w pustej przestrzeni. Dla światła nie jest potrzebny żaden wzorzec spoczynku. Światło porusza się ze swoją prędkością względem wszystkiego i wszystkich. Ale jak to możliwe? Prędkość mierzymy dzieląc odległość przez czas. Od czasu Newtona nie tylko przestrzeń była uznana za absolutną, ale i czas. Newton stwierdził: „czas istnieje sam z siebie i dla siebie, płynąc jednostajnie bez potrzeby odniesienia do czegokolwiek zewnętrznego”. Czyli według Newtona istnieje bezwzględne pojęcie czasu. Einstein to zakwestionował. Uznał za błędne idee absolutnej przestrzeni i absolutnego czasu.

### 3.4 Wyrafinowany, ale nie złośliwy

Skoro prędkość światła jest stała, przestrzeń i czas zależą od obserwatora. Każdy z nas ma własny zegar i własną linijkę. Kiedy poruszamy się względem siebie, nasze zegary i linijki przestają się ze sobą zgadzać. Ciała poruszają się zarówno w przestrzeni jak i w czasie. Np. gdy parkujący samochód odjeżdża, część jego ruchu w czasie zostanie zamieniona na ruch w przestrzeni. Zasada: sumaryczna prędkość każdego ruchu ciała w przestrzeni i jego ruchu w czasie równa się prędkości światła. Tak więc w czasie ruchu z prędkością światła czas się zatrzymuje. Tak jest np. z fotonem.

### 3.5 A z wiadrem?

W szczególnej teorii względności (STW) Einstein zajął się ruchem ze stałą prędkością. 10 lat później (1915) tworząc ogólną teorię względności (OTW) poradził sobie z ruchem przyspieszonym. W całkowicie pustym wszechświecie, wprawieni w ruch obrotowy, odczuwalibyśmy działającą na zewnątrz siłę. STW twierdzi, że niektóre rzeczy są względne, ale istnieje absolutna czasoprzestrzeń i to ona właśnie jest punktem odniesienia tego ruchu przyspieszonego.

### 3.6 Kształtowanie przestrzeni i czasu

Wyobraźmy sobie czasoprzestrzeń jako trójwymiarowy blok przestrzenny zawierający zamrożone kolejne chwile teraźniejszości. Jeśli obserwatorzy poruszają się względem siebie, ich zegary się rozsynchronizują. I chwila teraźniejsza dla jednego może być dla drugiego przeszłością albo przyszłością. Jest to zasada względności równoczesności.

### 3.7 Przekroje pod różnymi kątami

Wyobraźmy sobie czasoprzestrzeń jako wielki, podłużny bochen chleba. Kolejne chwile teraźniejszości są jakby kromkami tego bochna. Jeśli obserwatorzy nie poruszają się względem siebie, są jakby na przeciwległych końcach uciętej w poprzek kromki. Jeśli się jednak poruszają się względem siebie, wygląda to tak jakby byli na przeciwległych końcach kromki, ale tym razem ukrojonej pod pewnym kątem. Wtedy jeden jest jakby bardziej z przodu bochna a drugi z tyłu. Ale bochen jest czasoprzestrzenią na osi czasu. Kromka ukrojona pod kątem oznacza, że jeden jest „do przodu” w czasie w porównaniu z drugim. Tak więc, jeśli się poruszają względem siebie, ich chwile teraźniejszości nie są tożsame ze sobą. To co jeden widzi, jako dziejące się teraz, inny widział jakiś czas temu, albo dopiero zobaczy.

### 3.8 Wiadro według szczególnej teorii względności

W szczególnej teorii względności nie wszystko jest względne. Względne są przestrzeń i czas, ale istnieje absolutna całkowita czasoprzestrzeń.

### 3.9 Grawitacja i odwieczne pytanie

Podsumowanie:

Newton przestrzeń jest bytem, ruch przyspieszony nie jest względny

Leibniz przestrzeń nie jest bytem, wszystkie przejawy ruchu są względne

Mach przestrzeń nie jest bytem, ruch przyspieszony odczuwamy względem

średniego rozkładu masy we Wszechświecie

Einstein przestrzeń i czas rozpatrywane oddzielnie są względne, czasoprzestrzeń jest bytem absolutnym.

Co z ruchem przyspieszonym? W szczególnej teorii względności (STW) została pominięta grawitacja. Według Newtona grawitacja działa momentalnie, tzn. szybciej od światła. Usuwając dalekie źródło światła i masy, np. Księżyc, grawitacja zniknęłaby zatem zanim zniknąłby nam z oczu sam Księżyc. Według Einsteina to niemożliwe. Zajął się więc i grawitacją i ruchem przyspieszonym.

### 3.10 Równoważność grawitacji i przyspieszenia

Einstein w ogólnej teorii względności stwierdził, że grawitacja i ruch przyspieszony to dwie strony tej samej siły. Obie siły są sobie równoważne. Jest to fundamentalna dla ogólnej teorii względności zasada równoważności. Jeśli siedzisz w fotelu też przyspieszasz, bo czujesz siłę grawitacji. Przyspieszasz względem obserwatora, na którego nie działa żadna siła. Wpływ grawitacji odczuwamy tylko wówczas, jeśli się jej przeciwstawiamy.

### 3.11 Odkształcenia, zakrzywienia i grawitacja

Skoro grawitacja i przyspieszenie są równoważne, grawitacja musi być wynikiem zakrzywienia struktury czasoprzestrzeni. Materia i energia mają taki wpływ na czasoprzestrzeń jak kula do kręgli umieszczona na batucie (do skakania), którą wygina w dół i pobliskie ciała turlają się do niej. W podobny sposób materia i energia zakrzywiają czasoprzestrzeń i przyciągają inne ciała. Przyciąganie zawdzięczamy falom grawitacyjnym, które przemieszczają się z prędkością światła.

### 3.12 Ogólna teoria względności (OTW) i wiadro

Zgodnie z OTW punktem odniesienia dla każdego rodzaju ruchu (także przyspieszonego) są swobodnie spadający obserwatorzy, którzy się poddali grawitacji i nie odczuwają działania żadnej siły. Siła grawitacyjna, której się poddali, pochodzi od całej materii i energii w kosmosie. Czyli ciało przyspiesza względem punktu odniesienia, na który wpływ ma cała materia wszechświata.

### 3.13 Czasoprzestrzeń w trzecim tysiącleciu

Einstein: czasoprzestrzeń jest czymś fizycznie istniejącym

## 4 Splątanie przestrzeni. Co w kwantowym wszechświecie oznacza rozdzielenie przestrzenne ciał?

### 4.1 Wstęp

Niezwykłość szczególnej teorii względności (STW) polega na tym, że doświadczenie czasu i przestrzeni dwóch osób może się różnić radykalnie od siebie. Niezwykłość wynika tu z porównania doznań różnych osób. Niecodziennosc mechaniki kwantowej nie wymaga takiego porównania, ponieważ niszczy ona całkowicie nasze codzienne poczucie rzeczywistości

### 4.2 Świat według mechaniki kwantowej

Mechanika kwantowa (MK) zrywa z tradycją, że gdybyśmy wiedzieli gdzie są wszystkie cząstki oraz jak szybko i w jakim kierunku się poruszają, moglibyśmy przewidzieć wszystko we Wszechświecie. Mechanika kwantowa stwierdza, że nigdy nie będziemy znać dokładnie nawet kilku cech naraz pojedynczej cząstki (np. jej położenia i prędkości) a co dopiero mówić ewolucji całego kosmosu. Wszystko na co możemy liczyć to znajomość prawdopodobieństwa.

Ale mechanika kwantowa zrywa z tradycją jeszcze radykalniej. Fizyka Newtona i Einsteina głoszą, że Wszechświat cechuje lokalność. Oznacza to, że przestrzeń

oddziela ciała od siebie. Aby mogły one na siebie wpływać muszą jakoś tę odległość pokonać: zderzyć się, oddziaływać falami, polami, wymienić informacje. Według MK Wszechświat pozwala na istnienie powiązań nielokalnych. Oznacza to, że coś, co się dzieje tutaj (np. pomiar własności cząstki) może być powiązane z tym, co się dzieje gdzie indziej, nawet tak daleko, że światło nie ma czasu przebiec między tymi zdarzeniami. Coś jak woodoo. Jest to zjawisko splątania kwantowego, w pełni zgodne z teorią kwantową (TK) i potwierdzone przez doświadczenia.

#### 4.3 Czerwono i niebiesko

Przykład splątania kwantowego: są dwie cząstki, odległe od siebie o tysiące lat świetlnych. Są kwantowo ze sobą splątane, np. są to dwa fotony wyemitowane z wysokoenergetycznego atomu wapnia. Dopóki ich nie badamy i nie mierzymy, są w stanie nieokreślonym (nie wiadomo jakie mają własności, wiadomo tylko jakie są ich prawdopodobieństwa). Zmierzenie jednej cząstki powoduje, że przyjmuje ona jedną konkretną własność, np. spin (czyli upraszczając - kierunek obrotu wokół osi). Druga cząstka, jeśli ją zbadamy równocześnie z pierwszą, przyjmie ten sam spin. Między cząstkami nie było oddziaływania wzajemnego, bo odległość za duża nawet dla światła a pomiar był równoczesny. Pytanie: skąd się wzięła ta zgodność? Mechanika kwantowa stwierdza, że jest to powiązanie nielocalne, kwantowe dwóch cząstek i tyle. Einstein się z tym nie zgadzał i twierdził, że jest to efekt posiadania przez obie cząstki tych własności już w chwili ich wyemitowania a nie efekt ulegania wpływowi dziwnego, działającego na duże odległości splątania kwantowego. Spór kto ma rację trwał ponad 50 lat. W latach 60. John Bell zaproponował eksperyment rozsądający. Dokonano go w latach 80. Okazało się, że Einstein nie miał racji.

#### 4.4 Wzbudzając fale

Światło przechodząc przez dwie szczeliny tworzy na ekranie nie dwa osobne ślady, ale wzór interferencyjny (1927, Davisson, Germer), podobny do okręgów, jakie się rozchodzą na wodzie, gdy wrzucimy kamyk. To dowód że światło jest falą. Wzór interferencyjny jest dowodem, że strumień cząstek, np. fotonów, jest falą. Ale wzór interferencyjny powstaje także, gdy przez szczeliny przepuszczamy pojedyncze fotony. Jak to możliwe, by jedna cząstka była falą?

#### 4.5 Prawdopodobieństwo i prawa fizyki

Odpowiedź Maxa Borna (1927): „fala, która interferuje to fala prawdopodobieństwa”. Chodzi o prawdopodobieństwo znalezienia się cząstki (elektronu, fotonu itd.) w określonym miejscu. Im prawdopodobieństwo jest wyższe tym fala wyższa. Czyli pojedyncza cząstka (np. elektron) jest nie tylko cząstką, ale i falą rozpościerającą się na cały Wszechświat. Przez ponad 80 lat potwierdzono użyteczność fal prawdopodobieństwa mechaniki kwantowej (MK) do przewidywania wyników eksperymentów. Ale nadal nie wiemy czym one faktycznie są. Prawdopodobieństwo wprowadzone przez MK ma charakter fundamentalny: należy do natury rzeczywistości. W mikrokosmosie rządzi prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia.

#### 4.6 Einstein i mechanika kwantowa

Dlaczego w naszym zwykłym świecie nie mamy do czynienia z taką niepewnością odnośnie codziennych wydarzeń jak to jest w mechanice kwantowej (MK)? Na przykład powietrze w pokoju nie znika nagle, aby się pojawić po drugiej stronie Księżyca. Odpowiedź: po pierwsze, fala prawdopodobieństwa ma dodatnią wartość na niewielkim obszarze i potem szybko spada niemal do zera; po drugie, otaczają nas rzeczy złożone w mnóstwa cząstek. Prawdopodobieństwo zajścia przez nie wszystkie czegoś nieprawdopodobnego jednocześnie jest w praktyce równe zero.



Einstein chciał wykazać, że MK nie jest ostatecznym wyjaśnieniem, jak działa Wszechświat. Fala prawdopodobieństwa była według niego rozwiązaniem zastępczym wobec bardziej precyzyjnego opisu, którego nie mamy. Einstein: skoro w chwili pomiaru odnajdujemy elektron w położeniu  $x$ , to chwilę przedtem musiał być bardzo blisko miejsca  $x$ . Odpowiedź Bobra (tzw. kopenhaska interpretacja mechaniki kwantowej): „nie ma sensu pytać, gdzie był elektron przed pomiarem. Nie ma on określonego położenia ani przed ani po pomiarze”. Czyli akt pomiaru jest ściśle powiązany z tworzeniem rzeczywistości, którą badamy.

#### 4.7 Heisenberg i nieoznaczoność

Własności świata na poziomie subatomowym można podzielić na listę cech A i B. Poznając pierwszą cechę z listy A tracimy możliwość poznania pierwszej cechy z listy B. Brak możliwości jednoczesnego określenia wszystkich cech z obu list to nieoznaczoność, o której mówi zasada Heisenberga. Im dokładniej poznajemy jedną cechę (np. położenie), tym mniej dokładnie poznajemy drugą (np. prędkość). Powód: na poziomie supermikro obserwacja zakłóca równowagę, bo np. światło mikroskopu elektronowego oddziałuje na obserwowany elektron. Natura ma wbudowane ograniczenie dokładności określania komplementarnych cech. Nieoznaczoność jest wbudowana w strukturę falową mechaniki kwantowej i istnieje bez względu na to, czy pomiar jest przeprowadzany.

#### 4.8 Einstein, nieoznaczoność i rzeczywistość

Czy zasada nieoznaczoności (ZN) mówi tylko, czego się możemy dowiedzieć o rzeczywistości czy jest jej adekwatnym opisem? Dla Bobra nie miało to znaczenia, bo rzeczywistością jest to, co można zmierzyć. „Głębsza” analiza nie ma sensu. Einstein, Podolsky i Rosen (EPR) sprzeciwili się temu. Ich zdaniem każda cząstka ma określone własności, np. położenie i prędkość w dowolnym momencie a zasada nieoznaczoności jest dowodem, że teoria kwantowa (TK) nie umie sobie z tym poradzić i jest niekompletną teorią fizycznej rzeczywistości. EPR: jeśli cząstka ulega rozpadowi na dwie cząstki o takiej samej masie, które odlatują w dwóch przeciwległych kierunkach, prędkości ich będą takie same i położenie też. Jeśli więc zmierzmy położenie lub prędkość jednej z nich, będziemy znali położenie lub prędkość drugiej. Tak więc, nie mierząc drugiej cząstki wiemy, że ma określone własności. Teoria kwantowa zaś twierdziła i twierdzi, że cząstka przed pomiarem nie ma określonych własności.

#### 4.9 Odpowiedź mechaniki kwantowej

Podsumowanie Pauliego, jednego z twórców TK: nie ma sensu zastanawiać się czy coś istnieje, jeśli nie możemy się o tym niczego dowiedzieć. Spór był nierozstrzygnięty do roku 1964, kiedy to John Bell zaproponował doświadczenie rozstrzygające.

#### 4.10 Bell i spin

Eksperyment Bella: wiadomo, że cząstki wirują wokół swej osi. Zawsze w jedną stronę i z tą samą szybkością zgodnie z ruchem wskazówek zegara lub przeciwnie. Oś obrotu może się zmienić, ale prędkość nie. Cząstka ma też spin, tzn. własność, dzięki której wykonuje ruch obrotowy jak bąk (spin czyli wewnętrzny moment pędu). Zasada nieoznaczoności (ZN) mówi, że dla mikroskopijnych cząstek nie można wyznaczyć spinu dla więcej niż jednej osi. Co to znaczy? Choć oś wirującej piłki futbolowej może być np. skierowana na północny wschód i moment pędu rozkłada się wtedy częściowo (ułamkowo) na kierunek północny i na kierunek wschodni, w przypadku cząstki subatomowej pomiar spinu dla jakiegokolwiek osi nigdy nie da wyniku ułamkowego. Jakby sam pomiar zmuszał elektron (lub inną cząstkę) do zgromadzenia całego swojego wirowania wokół osi, którą akurat

wybraliśmy (nawet przypadkowo) przy pomiarze. Problem do rozwiązania w eksperymencie proponowanym przez Bella: czy cząstka ma określoną wartość spinu dla każdej osi, mimo, że z powodu ZN nie umiemy zbadać wartości tego spinu dla więcej niż jednej osi jednocześnie, czy też cząstka nie ma tych cech (wartości) naraz, bo jest w kwantowym stanie zawieszenia bez określonego spinu wokół jakiegokolwiek osi aż do chwili, gdy ktoś go zmierzy? Bell odkrył, że jeśli nawet nie możemy określić wartości spinu cząstki dla więcej niż jednej osi, to jeśli ma ona określony spin dla wszystkich, istnieje sprawdzalna i możliwa do zaobserwowania konsekwencja takiego spinu.

#### 4.11 Testowanie rzeczywistości

Ekspertyment Bella wygląda tak: mamy dwa detektory rejestrujące równocześnie dwie rozbiegające się cząstki wyemitowane z atomu np. wysokoenergetycznego wapnia. Każdy z detektorów może badać wartość spinu (wartość A - zgodnie z ruchem wskazówek zegara lub wartość B - przeciwnie do ruchu wskazówek) na jednej z trzech wcześniej ustalonych osi: 1,2,3. Wybór osi w każdym detektorze jest za każdym razem przypadkowy. Istnieje więc 9 możliwych ustawień obu detektorach przy pomiarze osi każdej cząstki: 1-1 (pierwsza liczba to numer osi na pierwszym detektorze, druga liczba to numer osi na drugim detektorze), 1-2 (wyjaśnienie: oś 1 na pierwszym detektorze i oś 2 na drugim), 1-3, 2-1, 2-2, 2-3, 3-1, 3-2, 3-3. Jeśli obie cząstki mają ustalone wcześniej (jak twierdzi Einstein) spiny dla każdej osi, np. dla osi 1 – wartość A, dla osi 2 – też A, a dla osi 3 – B, wtedy detektory wykryją w 5 przypadkach na 9 ten sam spin: w trzech przypadkach są to te same osie 1-1, 2-2, 3-3, a dwóch przypadkach (1-2, 2-1) też ten sam spin, bo takie spiny miały cząstki ustalone wcześniej (w naszym przykładzie jest to wartość A). Taki rozkład (co najmniej 5 na 9) działa w przypadku każdego możliwego spinu cząstek, o ile zostały wcześniej „zaprogramowane”. O ile cząstki, jak dowodził Einstein, mają zawsze określone spiny, to dokonując pomiaru wielkiej liczby cząstek, w ponad 50% przypadków detektory wykryją ten sam spin. Jeśli jednak wynik będzie poniżej 50% oznaczać to będzie, że – zgodnie z teorią kwantową – a/ cząstki subatomowe nie posiadają przed pomiarem żadnych konkretnych własności i b/ istnieje kwantowe splątanie polegające na tym, że w chwili pomiaru obie cząstki, niezależnie od oddalenia od siebie (mogą to być lata świetlne) „uzgadniają” natychmiast jaką wartość pokazać. To „natychmiast” zachodzi szybciej niż czas potrzebny obu cząstkom na „skontaktowanie” się ze sobą, gdyby to robiły nawet z prędkością światła. To uzgodnienie jest nielokalnym powiązaniem. Pomysł tego eksperymentu zapewnił Bell’owi trwałe miejsce w panteonie fizyki.

#### 4.12 Jak policzyć aniołki Pauliego

#### 4.13 Ogień bez dymu

Ekspertyment Bella został zrealizowany dopiero w latach 70. i 80. (Aspect, Gisin w oparciu o prace Freedmana, Clausera, Fry’ a, Thompsona). Wcześniej technika pomiarowa nie była dostatecznie rozwinięta. Wynik eksperymentu: detektory nie zgadzały się ze sobą w ponad 50% przypadków. Teza Einsteina, Podolskiego i Rosena została więc obalona. Teoria kwantowa i jej twierdzenia, że cząstka nie posiada żadnych konkretnych własności przed dokonaniem pomiaru oraz że istnieje splątanie kwantowe cząstek okazały się prawdziwe.

#### 4.14 Splątanie a szczególna teoria względności: podejście standardowe (str. 133)

Gdyby „uzgodnienia” między splątanymi cząstkami polegały na przekazywaniu sobie jakichś informacji, zachodziłyby z prędkością większą od prędkości światła i byłoby to sprzeczne ze szczególną teorią względności (STW). Ale tak nie jest. Między cząstkami w eksperymencie Bella nie zachodzi wymiana informacji. Każda

cząstka ma zawsze 50% szans na posiadanie spinu A lub B a detektory ustawiane są losowo. Nie istnieje więc żaden ukryty kod komunikowania się cząstek ze sobą. Uznajemy zatem, że obie splątane cząstki, mimo oddalenia od siebie są częścią jednego ciała fizycznego. I to jest właściwe wyjaśnienie zjawiska splątania kwantowego.

#### 4.15 Splątanie a szczególna teoria względności: podejście alternatywne

Choć wyniki eksperymentu Bella i szczególna teoria względności są ze sobą w zgodzie, pozostaje pytanie jak dwie oddalone od siebie cząstki, z których każda podlega prawu przypadkowości mechaniki kwantowej, mogą pozostawać ze sobą w kontakcie i jedna robi natychmiast to, co druga. Zgodnie ze standardowym wyjaśnieniem teorii kwantowej (TK) pomiar cząstki redukuje falę prawdopodobieństwa i ta redukcja zachodzi w sposób natychmiastowy w całym Wszechświecie. W naszym eksperymencie pomiar wartości spinu jednej cząstki redukuje do zera tę część fali prawdopodobieństwa, która opisuje przeciwną wartość spinu. To powoduje, że cząstka splątana z mierzoną przyjmuje natychmiast tę samą wartość spinu, co mierzona. Ten wielki sukces TK nie powinien przesłonić kilku problemów. Po pierwsze, od 70 lat nikt nie rozumie w jaki sposób tak naprawdę dochodzi do redukcji fali prawdopodobieństwa i czy ona faktycznie następuje. Zakładanie tej redukcji dobrze współgra w wynikami eksperymentalnymi, ale pytanie zostaje. Po drugie, zgodnie ze szczególną teorią względności (STW) zdarzenia jednoczesne (w tym przypadku redukcja) dla jednego obserwatora nie muszą być jednoczesne dla innego. A więc redukcja fal prawdopodobieństwa preferuje jeden punkt widzenia, obserwatora, dla którego pomiary po obu stronach laboratorium zachodzą jednocześnie. Ale to jest sprzeczne z egalitarnym podejściem STW. Debata trwa...

#### 4.16 Co z tego wszystkiego wynika dla nas?

## Czas i doświadczenie

### 5 Zamarznięta rzeka. Czy czas płynie?

#### 5.1 Wstęp

Czas należy do najczęściej używanych i najslabiej rozumianych pojęć. Pytania, które nas nurtują: skąd się bierze czas? Co by było, gdyby Wszechświat był pozbawiony czasu? Czy to możliwe, że istnieje więcej niż jeden wymiar czasowy? Co z podrzami w czasie? Czy istnieje najmniejsza ilość czasu? Czy czas jest podstawowym składnikiem kosmosu, czy tylko użytecznym pojęciem do porządkowania wrażeń?

#### 5.2 Czas i doświadczenie

Doświadczenie mówi nam wyraźnie, że przeszłość różni się od przyszłości. Dwie podstawowe własności czasu: 1/ wydaje się, że czas płynie; 2/ wydaje się, że czas ma określony kierunek. Jeśli płynie, to co tak naprawdę płynie? Co do kierunku, skąd się wzięła strzałka czasu od przeszłości do przyszłości?

#### 5.3 Czy czas płynie?

Fizyka nie znalazła potwierdzenia naszego intuicyjnego poczucia upływu czasu. Jeśli spojrzymy na czasoprzestrzeń jak na wielki, podłużny blok żółtego sera, którego kolejne plastry to kolejne chwile terażniejsze, to fizyce nie udało się znaleźć światła, który by oświetlało te kolejne chwile. Z punktu widzenia fizyki wszystkie chwile są równoprawne. Einstein: „rzeczywistość obejmuje przeszłość, terażniejszość i przyszłość na równych prawach i przepływ czasu jest iluzoryczny”.

#### 5.4 Trwała iluzja przeszłości, terażniejszości i przyszłości

Szczególna teoria względności (STW): jeśli oddaleni od siebie o tysiące, miliony lat świetlnych dwaj obserwatorzy nie poruszają się, terażniejszość jednego jest terażniejszością drugiego. Jeśli jednak pierwszy zacznie się oddalać od drugiego, nawet z niewielką prędkością, jego terażniejszość będzie przeszłością drugiego i to tym odleglejszą, z im większą prędkością się oddala. I odwrotnie, jeśli pierwszy obserwator przybliży się, jego terażniejszość staje się przyszłością drugiego.

#### 5.5 Doświadczenie a upływ czasu

Jeśli skonfrontujemy stwierdzenia fizyki o istnieniu bloku czasoprzestrzeni i nasze odczucie upływu czasu musimy uznać, że jedynym schronieniem dla tego upływu jest nasz umysł. Każda chwila czasoprzestrzeni istnieje zawsze, niezależnie od tego, czy ktoś ją przeżywa jako terażniejszą. Pozostaje jednak fundamentalne pytanie: czy to nauka nie potrafi objąć podstawowej własności czasu, którą ludzki umysł przyswaja tak samo naturalnie jak płuca nabierają powietrze? Czy też to tylko ludzki umysł przypisuje czasowi stworzone przez siebie własności, które są całkowicie sztuczne i które właśnie dlatego nie pojawiają się w prawach fizyki?

### 6 Przypadek i strzałka. Czy czas ma kierunek?

#### 6.1 Wstęp

Nawet jeśli czas nie płynie ma sens pytanie, czy ma strzałkę, czyli kierunek. Czy istnieje jakiś porządek ułożenia zdarzeń wzdłuż czasoprzestrzeni? Czy istnieje istotna różnica między jednym ułożeniem a odwrotnym?

#### 6.2 Łamigłówka

Bez przerwy widzimy, że wydarzenia dzieją się w jednym kierunku a nie w przeciwnym. Pizza w drodze do domu stygnie a nie ogrzewa się, jajko może się

rozbić ale nie złożyć z powrotem. Miliony zdarzeń, które zachodzą w jednej jedynej kolejności a nie w odwrotnej stanowią podstawę pojęć „przed” i „potem”. Obserwujemy wyraźną asymetrię na osi czasu. Ta olbrzymia liczba regularności, przekonująca nas o istnieniu strzałki czasu, każe przypuszczać o istnieniu jakiegoś podstawowego prawa natury z tym związanego. Tymczasem fizycy żadnego takiego prawa nie wykryli. Więcej, wszystkie prawa fizyki wykazują całkowitą symetrię między przeszłością a przyszłością.

### 6.3 Przeszłość, przyszłość i podstawowe prawa fizyki

Znane prawa fizyki nie tylko nie tłumaczą, dlaczego wydarzenia zachodzą tylko w jednym kierunku, ale wręcz twierdzą, że teoretycznie mogą one zachodzić w kierunku przeciwnym.

### 6.4 Symetria odwrócenia czasu

Co to znaczy, że prawa fizyki są symetryczne ze względu na odwrócenie czasu? Otóż np. trajektoria wylotu i powrotu na Ziemię piłki tenisowej wystrzelonej z pierwszą prędkością kosmiczną jest taka sama. Oglądając taki film nie wiadomo, czy patrzymy na jej wylot czy powrót, ale puszczonej od końca. Zasada jest taka: ruch zachodzący przy upływie czasu w jego zwykłym kierunku w przód może równie dobrze odbywać się w kierunku przeciwnym.

### 6.5 Piłki tenisowe i rozbite jajka

### 6.6 Zasada i praktyka

Zauważmy, że spowodowanie, by wiele ze zdarzeń zachodzących w „normalnym” kierunku, czyli w przód, zaszło w kierunku odwrotnym jest nieskończenie trudniejsze. Choćby spowodowanie, by rozbite jajko na powrót się scalilo. Łatwo-trudno naprowadza na dobry kierunek, ale trzeba ponadto wprowadzić pojęcie entropii.

### 6.7 Entropia

Rozważmy rozrzucenie w górę 693 kartek „Wojny i pokoju” a potem ich ułożenie w równy stos. Szansa, że w tym stosie kartki ułożą się w kolejności stron jest znikoma. Jest tylko jedno właściwe uporządkowanie stron i  $10^{1878}$  złych kombinacji. Kartki porozrzucane cechuje wysoka entropia, a uporządkowane – niska. Entropia to miara nieuporządkowania układu fizycznego (Ludwig Boltzmann). W układzie fizycznym z wieloma elementami istnieje naturalny trend ewolucyjny w kierunku zwiększania nieporządku, ponieważ jest o wiele więcej sposobów osiągnięcia stanu nieuporządkowania niż uporządkowania. Układy fizyczne mają skłonność do ewolucji w kierunku stanów o większej entropii. Wysoką entropię układ ma wtedy, gdy przetasowanie jego elementów (np. Wojny i pokoju) jest praktycznie niezauważalne, zaś niską - gdy łatwo zauważymy niemal każdą zmianę.

### 6.8 Entropia, drugie prawo i strzałka czasu

Tendencja układów fizycznych do ewolucji w kierunku wyższej entropii znana jest jako drugie prawo termodynamiki (pierwsze to prawo zachowania energii). Podstawą tego prawa proste statystyczne rozumowanie: więcej jest możliwości, aby układ zwiększył entropię, a „więcej możliwości” oznacza większe prawdopodobieństwo. Ale to nie wyklucza przejścia od stanu o wysokiej do stanu o niskiej entropii, choć statystycznie jest to mniej prawdopodobne. Wydaje się, że II prawo termodynamiki definiuje strzałkę czasu. Strzałka czasu wskazująca jego upływ do przodu pokazuje kierunek rosnącej entropii. Choć statystycznie może zdarzyć się kierunek odwrotny.

- 6.9 Entropia: przeszłość i przyszłość  
Choć odczuwamy strzałkę czasu jako naturalny porządek rzeczy, prawa fizyki jej nie znają. Stąd płynnie zaskakujący wniosek: z punktu widzenia fizyki, ewolucja układów (zwłaszcza złożonych) ku wyższej entropii działa równie dobrze w odniesieniu do przyszłości (to dla nas naturalne) jak i do przeszłości. Oznacza to, że jeśli dany układ nie ma aktualnie najwyższej entropii, jest bardzo prawdopodobne, że wkrótce osiągnie jej wyższy poziom, ale też, że ten wyższy poziom miał w przeszłości. Przykład: jeśli w szklance są do połowy stopione kostki lodu należy oczekiwać, że się stopią, ale także że w przeszłości ich szklance nie było. Jest jasne, że połowa wniosków odnośnie entropii, ta dotycząca przeszłości, brzmi dla nas absurdalnie.
- 6.10 Matematyczny punkt widzenia  
Kłopot wynika z faktu, że podstawowe prawa ruchu nie mają wbudowanego żadnego rozróżnienia pomiędzy przeszłością i przyszłością i stosowana w nich matematyka traktuje w ten sam sposób przeszłość i przyszłość dowolnej chwili.
- 6.11 Grzęzawisko  
Ten sam dziwny wniosek mógłby być zastosowany do całego Wszechświata. Wysnuł go Ludwig Boltzmann. Z punktu widzenia statystyki jest niezwykle mało prawdopodobne, by w przeszłości Wszechświat miał niższą entropię. Czyli jego obecny stan to sekundowa przypadkowa konfiguracja. Czyli nasza przeszłość, łącznie z naszymi wspomnieniami, to sekundowe, przypadkowe ustawienie Wszechświata.
- 6.12 Krok wstecz  
Takie rozumowanie jest dla nas absurdalne. Żeby z tego wybrnąć, żeby nadal pokładać ufność we własne wspomnienia z przeszłości, aby wierzyć, że nie są ułudą i przypadkową, sekundową konfiguracją Wszechświata, musimy wyjaśnić historię Wszechświata jako ewolucję od niskiej ku wyższej entropii. To nas zaprowadzi do analizy warunków jakie panowały na początku istnienia Wszechświata.
- 6.13 Jajko, kura i Wielki Wybuch  
Kura, układ o wysokim stopniu uporządkowania (niska entropia), pobiera energię w formie pożywienia o niskiej entropii (np. ziarno) i oddaje ją do środowiska w formie wysoce nieuporządkowanej, jako ciepło. Zjadane rośliny, układy także o niskiej entropii powstają dzięki fotosyntezie pobierając energię słoneczną (Słońce to układ wysoce uporządkowany a więc o niskiej entropii) a wydalając energię w formie nieuporządkowanej (dwutlenek węgla). W ten sposób pytanie o pochodzenie niskiej entropii doprowadziło do pytania, skąd się wzięło wysoce uporządkowane (a więc o niskiej entropii) Słońce. Odpowiedź: powstało 5 miliardów lat temu, kiedy obłok gazu zaczął wirować i pod wpływem siły grawitacji zgęstniał. Skąd się wziął ten gaz? Powstał w wyniku Wielkiego Wybuchu. Ważne, że ten jednorodny gaz wypełniający Wszechświat tuż po Wybuchu miał bardzo niską entropię.
- 6.14 Entropia i grawitacja  
Zwykle jednorodnie rozprzestrzeniony gaz, np. dwutlenek węgla uchodzący z butelki Coca-Coli, ma wysoką entropię (jest nieuporządkowany). Ale jeśli na gaz działa silna grawitacja, jest inaczej. Gaz cechuje wówczas bardzo niska entropia. I tak było na początku istnienia Wszechświata. Po upływie miliarda lat od Wielkiego Wybuchu grawitacja spowodowała, że gaz zaczął formować skupiska, z których powstały gwiazdy i galaktyki.
- 6.15 Kluczowy stan początkowy  
Opis przedstawiony powyżej wyjaśnia, że entropia nie wzrasta w kierunku

przeszłości, ponieważ na początku Wszechświata panowała niska a nie wysoka entropia. Warunki panujące w momencie narodzin Wszechświata są kluczowym czynnikiem dla ustawienia strzałki czasu. Przyszłość jest rzeczywiście kierunkiem, w którym rośnie entropia.

#### 6.16 Nierozwiązana zagadka

Pozostaje do rozwiązania zagadka, jak to się stało, że Wszechświat rozpoczął się od struktury o bardzo wysokim stopniu uporządkowania (niskiej entropii).

### 7 Czas i kwanty. Spojrzenie na naturę czasu z perspektywy świata kwantów

#### 7.1 Wstęp

Najbardziej zadziwiającym odkryciem fizyki ostatnich stu lat jest mechanika kwantowa, bo podważa podstawy pojęciowe fizyki klasycznej, czasu, przeszłości i przyszłości.

#### 7.2 Przeszłość według mechaniki kwantowej

Idea Richarda Feynmana w odniesieniu do mechaniki kwantowej nosi nazwę podejścia opartego na sumowaniu po historiach. Pojedynczy elektron biegnie w kierunku ekranu równocześnie przez dwie, ustawione na jego drodze szczeliny a fale wyłaniające się z obu szczelin to obraz dwóch równoległych przeszłości tego elektronu. Wszystkie historie elektronu zdarzają się jednocześnie a każda wnosi swój wkład do prawdopodobieństwa zrealizowania ich wspólnego efektu.

#### 7.3 W drodze do krainy Oz

Oto eksperyment pokazujący wzajemne oddziaływanie tych równoczesnych, alternatywnych historii. Z lasera biegnie wiązka światła do rozdzielacza wiązki (półprzepuszczalne lustro). Po przejściu przez rozdzielacz połowa światła biegnie w lewą stronę a połowa w prawą stronę. Obie połowy odbijają się następnie od zwykłych lusterek i trafiają w ekran. Ponieważ światło jest falą, pojawi się wzór interferencyjny. Różnica między opisem klasycznym i kwantowym pojawi się, gdy z lasera emitować będziemy pojedyncze fotony co kilka sekund. Intuicja podpowiada, że w rozdzielaczu foton wybierze albo kierunek w lewo albo w prawo i nie będzie interferencji, bo pojedynczy foton nie ma z czym interferować. A jednak wzór interferencyjny się pojawi. A to dlatego, że określając prawdopodobieństwo uderzenia fotonu w ekran w tym lub innym punkcie musimy połączyć jego dwie możliwe historie. Gdy dodamy prawą i lewą falę prawdopodobieństwa dla każdego pojedynczego fotonu, otrzymamy prążki interferencji fal prawdopodobieństwa.

#### 7.4 Wybór

Jak należy traktować to sumowanie po historiach? Czy elektron rzeczywiście biegnie równocześnie wszystkimi możliwymi drogami, czy też opis Feynmana jest matematyczną sztuczką umożliwiającą uzyskanie poprawnej odpowiedzi? I kolejne pytanie: co takiego jest w pomiarze i obserwacji, że potrafią one zmusić wszystkie możliwe historie do zsumowania się i podania jednego wyniku? Jakim cudem sam fakt obserwacji informuje cząstkę, że czas na podsumowanie historii, uśrednienie ich wartości i na ostateczny wynik?

#### 7.5 Przycinanie historii

Możemy w eksperymencie z dwiema szczelinami lub z rozdzielaczem wiązki ustawić i włączyć detektory przed każdą szczeliną lub przy każdej z dwóch dróg. Ale przy włączonych detektorach zawsze zarejestrujemy, że elektron lub foton biegnie tylko jedną drogą i wzór interferencyjny nie powstanie. Wyjaśnienie: sama nasza obserwacja przycina drzewo kwantowej historii. Obserwując ingerujemy w tę historię, ujednoznaczniamy ją, zmieniamy zatem rozkład prawdopodobieństw.

## 7.6 Zmiany w historii

Nasza intuicja dotycząca tego, jak wydarzenia rozwijają się w czasie wystawiona jest na jeszcze większą próbę za sprawą teorii kwantowej. Prześledźmy eksperyment z opóźnionym wyborem zaproponowany przez Johna Wheelera w 1980 roku.

Wysyłamy foton do rozdzielacza wiązki jak w punkcie 7.3., a detektor fotonów ustawiamy na jednej z dwóch możliwych dróg, którymi foton pobiegnie po przejściu przez rozdzielacz. Pomiar „wyboru drogi” następuje więc po tym, gdy elektron „zdecydował się” w rozdzielaczu czy ma się zachować jak fala i pójść obiema drogami, czy jak cząstka i wybrać tylko jedną z dróg. Gdy foton przechodzi przez rozdzielacz „nie wie”, czy detektor jest włączony. Zresztą decyzja o włączeniu lub niewłączeniu detektora może następować po tym, jak foton przejdzie przez rozdzielacz.

Faktyczny przebieg eksperymentu: gdy detektor jest włączony, foton zachowuje się jak cząstka (na ekranie nie powstaje wzór interferencyjny); gdy detektor jest wyłączony, foton zachowuje się jak fala. Jakby fotony dostosowywały swoje zachowanie w przeszłości do sytuacji, która zajdzie później (gdy detektor zostanie włączony lub nie). Jakby foton miał „przecucie”, co go spotka za chwilę (detektor włączony lub nie) i odpowiednio do tego się zachowywał. Jakby spójna i ustalona historia pojawiała się dopiero wtedy, gdy ustalona zostanie w pełni przyszłość, do której ona prowadzi.

Wyjaśnienie: pojęcie przeszłości według mechaniki kwantowej różni się od pojęcia przeszłości zgodnego z naszą klasyczną intuicją. My uważamy, że foton w przeszłości zrobił to lub tamto. Ale w rzeczywistości kwantowej przeszłość to nieokreślona, niejasna, wielowątkowa rzeczywistość, mieszanka możliwości.

Dopiero dokonanie obserwacji łączy rzeczywistość kwantową z klasyczną.

Obserwacja nadaje większego znaczenia jednemu z wątków kwantowej historii. Zmienia rozkład prawdopodobieństwa.

## 7.7 Wymazywanie przeszłości

W dotychczasowych eksperymentach przeszłość nie była zmieniana. Ale skoro nie można zmienić tego, co się wydarzyło w przeszłości, być może można wymazać wpływ tej przeszłości na teraźniejszość? Pokazuje to eksperyment z wymazywaniem kwantowym (Scully, Drühl, 1982). Jest to odmiana eksperymentu z podwójną szczeliną (pkt. 4.4.), do której wpada pojedynczy foton przed uderzeniem w ekran. Przed każdą szczeliną ustawiamy urządzenie znakujące foton, które pozwoli potem zbadać, przez którą szczelinę foton przeszedł. Jeżeli znakowanie jest włączone, wzór interferencyjny (WI) się nie pojawia, bo znakowanie informuje o wyborze drogi. Obserwacja wskazuje na jedną z dwóch możliwych historii fotonu i zmienia rozkład fal prawdopodobieństwa. Lecz jeśli tuż przed uderzeniem oznakowanego fotonu o ekran usuniemy (wymażemy) znakowanie, wzór interferencyjny (WI) znów się pojawi. Foton „w ostatniej chwili” postanowił zachowywać się jak fala.

Wyjaśnienie: znakowanie rozmywa falę prawdopodobieństwa. Foton ciągle podróżuje obiema drogami, ale ta część jego fali prawdopodobieństwa, która została oznakowana jest bardziej rozmyta niż druga i na ekranie nie powstanie WI.

Wymazanie znakowania ponownie wyostreza falę prawdopodobieństwa i WI pojawia się.

## 7.8 Kształtowanie przeszłości

Jest jeszcze dziwniejszy aspekt kwantowego rozumienia czasu i przestrzeni.

Ukażemy go omawiając eksperyment z wymazywaniem kwantowym z opóźnionym wyborem (Scully, Drühl). Emitujemy z lasera foton, następnie foton ten trafia do rozdzielacza wiązki, gdzie wybiera drogę w lewo lub w prawo. Potem na obu



możliwych jego drogach ustawiamy duplikatory, które z jednego fotonu robią dwa: pierwszy foton, tzw. sygnałowy, biegnie do ekranu, aby wytworzyć na nim (lub nie) wzór interferencyjny a drugi, tzw. jałowy foton, biegnie do detektora, aby nam powiedzieć, którą drogą przeszedł foton sygnałowy. Dzięki duplikacji otrzymujemy informację o drodze fotonu sygnałowego nie badając go, nie dokonując jego pomiaru. Mimo to, gdy detektory są włączone i wiemy, którą drogą foton przebiegł wzór interferencyjny (WI) nie pojawia się. Gdy detektory wyłączymy WI pojawia się. Teraz najdziwniejsze: możemy wprowadzić foton jałowy do takiego labiryntu kolejnych rozdzielaczy i detektorów, że mimo, iż zostanie wykryty przez jakiś detektor, nie zawsze będzie wiadomo, czy odpowiada fotonowi sygnałowemu biegnącemu w lewo czy w prawo. Jeśli np. wpadnie do detektora 1 lub 4 będzie wiadomo, że ten foton jałowy jest bratem tego, który pobiegł w lewo (w prawo). Jeśli jednak wpadnie do detektora 2 lub 3, nie będzie wiadomo, któremu fotonowi sygnałowemu odpowiada zarejestrowany tutaj foton jałowy. I oto okazuje się, że tylko fotony sygnałowe, których odpowiedniki „jałowe” wpadną do detektorów 2 lub 3 tworzą wzór interferencyjny, pozostałe – nie. A więc zniszczenie nawet już wytworzonej informacji o wyborze drogi (labirynt prowadzący do detektorów 2 i 3) przywraca fotonowi naturę falową. Ekran rejestrujący uderzenia fotonów możemy ustawić w tym samym laboratorium, co laser emitujący fotony a detektory w odległości np. 1 roku świetlnego od laboratorium. Emitujemy wielką liczbę fotonów i na ekranie nie pojawia się WI. Ale po roku detektory zarejestrują wszystkie fotony jałowe. Jeśli będziemy wiedzieć, które fotony jałowe uderzyły w detektor 2 lub 3, to wówczas, wracając do wyniku eksperymentu sprzed roku, odkryjemy, że odpowiadające im fotony sygnałowe utworzyły wówczas WI. Oznacza to, że dopiero przyszłe zdarzenia (rejestracja po roku fotonów jałowych) umożliwia nam opis i zrozumienie tego, co zaszło przed chwilą (które z serii uderzeń o ekran utworzyły de facto wzór interferencyjny a które nie).

#### 7.9 Mechanika kwantowa (MK) a doświadczenie

Mechanika kwantowa opiera się na równaniu Schrödingera, odkrytego w roku 1926 opisującego kształt kwantowomechanicznej fali prawdopodobieństwa. Równanie to umożliwia wyliczenie jakie jest prawdopodobieństwo np. znalezienia się cząstki w danym miejscu w dowolnym momencie. MK pokazuje rozwój zjawisk w dwóch fazach. W fazie I funkcja falowa ewoluuje zgodnie z równaniem Schrödingera. Kształt fali prawdopodobieństwa zmienia się łagodnie i stopniowo. W fazie II, w wyniku pomiaru, następuje gwałtowna redukcja funkcji falowej. Redukcja następuje zgodnie z obserwacjami, ale funkcja Schrödingera takiej redukcji nie przewidywała. Wprowadzono ją jako dodatek.

#### 7.10 Zagadka kwantowego pomiaru

W jaki sposób eksperymentator powoduje redukcję funkcji falowej? Czy wszystkie pomiary powodują tę redukcję? Skoro równanie Schrödingera nie rozróżnia kierunków „do przodu” i „wstecz”, to czy równanie fazy II wprowadza asymetrię i strzałkę czasu? Prowadzi to nas to zagadnienia relacji między obiektami badanymi, kwantowymi (bardzo małymi) i tymi, które mierzą te obiekty (urządzenia pomiarowe, bardzo duże).

#### 7.11 Rzeczywistość i problem kwantowego pomiaru

Bohr: pomiar jest całą rzeczywistością. Próba zrozumienia dlaczego funkcja falowa rezygnuje ze wszystkich możliwości oprócz jednej, odczytywanej na liczniku jest stratą czasu. Ten punkt widzenia obowiązywał w świecie fizyki przez całe dziesięciolecie.

Heisenberg: funkcja falowa nie jest obiektywną rzeczywistością kwantową. Mówi tylko to, co wiemy o rzeczywistości. Przed pomiarem nie wiemy, co się dzieje z

cząstką. W chwili pomiaru następuje nagła zmiana stanu naszej wiedzy.  
Hugo Everest: funkcja falowa nie ulega redukcji. Każdy z potencjalnych pomiarów spełnia się w jednym ze wszechświatów równoległych.

Dawid Bohm: cząstka i funkcja falowa to dwa odrębne byty. Funkcja decyduje o ruchu cząstki.

Ghirardi, Rimini, Weber dokonali modyfikacji równania funkcji falowej Schrödingera. Według nich są to funkcje z natury niestabilne i następują ich samoistne, aczkolwiek niezmiernie rzadkie, redukcje.

Dotąd żadna z propozycji wyjaśnienia natury pomiaru kwantowego nie została dotąd powszechnie zaakceptowana.

#### 7.12 Dekohierencja a rzeczywistość kwantowa

Zagadnienie relacji obiektów małych i dużych zostało twórczo zaprezentowane przez Dietera Zeha w 1970 roku. Dotyczy zjawiska dekoherencji. Jeśli obiekt kwantowy jest izolowany od otoczenia wykazuje zjawisko interferencji i może być opisany przez funkcję falową prawdopodobieństwa. W świecie realnym zarówno obiekty mikro jak i makro nie są odizolowane od otoczenia. Funkcje falowe dużych obiektów są „szturchane” przez fotony i inne cząstki, które zakłócają jej koherencję i rozmywają uporządkowane następstwa jej grzbietu, doliny i następnego grzbietu. To jest właśnie zjawisko dekoherencji. Rozmycie funkcji falowej zapobiega zjawisku interferencji kwantowej obiektów bardzo małych i dużych. A gdy nie może zachodzić interferencja kwantowa, w wyniku dekoherencji środowiska (czyli tego „szturchania”), egzotyczne prawdopodobieństwa kwantowe przekształcają się w prawdopodobieństwa życia codziennego. Zjawisko dekoherencji jest zatem ważnym elementem do wyjaśnienia problemu pomiaru kwantowego (inne prace: Griffiths, Omnès, Gell-Mann, Hantle).

#### 7.13 Mechanika kwantowa i strzałka czasu

Spośród wielu propozycji analizy pomiaru kwantowego tylko koncepcja Ghirardiego, Riminiego i Webera wprowadza asymetrię czasu i strzałkę czasu.

## Czasoprzestrzeń i kosmologia

### 8 Płatki śniegu i czasoprzestrzeń. Symetria i ewolucja kosmosu

#### 8.1 Wstęp

Uczeni współcześni nader często uważają, że podstawowym prawem Wszechświata jest symetria

#### 8.2 Symetria i prawa fizyki

Symetria przedmiotów to przekształcenia, jakim można je poddać bez wpływu na ich wygląd. Kula jest wysoce symetryczna, sześciąt już mniej. To są symetrie w przestrzeni. Jest też symetria (lub też niezmienniczość) translacyjna, czyli zasada obowiązywania znanych praw natury niezależnie od tego, gdzie się znajdujemy i jaką część kosmosu badamy. Prawa Newtona czy Einsteina działają równie dobrze na Ziemi jak i na Księżycu. Ten typ symetrii ma dla nas kluczowe znaczenie, bo przecież prawa fizyki mogłyby być inne tu i tam, mogłyby też się nagle i ciągle zmieniać. Tymczasem wiemy, że wszędzie, w najodleglejszych, dostępnych obserwacjom częściach Wszechświata prawa natury są takie same. Einstein rozszerzył symetrię włączając prędkość światła do zbioru zjawisk, które nie ulegają zmianie. Słowem, fizycy są przekonani, że symetrie natury nie są konsekwencjami praw natury, ale podstawą, z której te prawa wynikają.

#### 8.3 Symetria i czas

Idea symetrii jest ważna dla koncepcji czasu. Jedną z funkcji czasu w tworzeniu kosmosu jest pełnienie roli księgowego rejestrującego wszelkie zmiany. Czas jest sposobem, w jaki natura zapobiega temu, by wszystko, wszystkie zmiany działy się naraz. Istnienie czasu polega na braku symetrii. Gdyby wszystko było symetryczne na osi czasu, ewolucja czy zmiana Wszechświata nie miałyby sensu. Czas byłby abstrakcyjną własnością obszaru. Mimo jednak, że istnienie czasu oznacza brak pewnej szczególnej symetrii, Wszechświat musi przestrzegać innej symetrii. Skoro szczególna teoria względności mówi, że upływ czasu zależy od prędkości, z jaką się poruszamy, co to znaczy że wiek Wszechświata wynosi 13,7 miliarda lat? Na jakim zegarze to jest liczone? Czy mieszkańcy odległych galaktyk tak samo oceniają wiek Wszechświata? Odpowiedź kryje się w symetrii – symetrii przestrzeni. Wszechświat jest wypełniony promieniowaniem mikrofalowym – pozostałością po Wielkim wybuchu (1964 – odkrycie tego promieniowania: Penzias, Wilson, potem: Dicke, Roll, Wilkinson, Peebles). To promieniowanie dostarcza nam obrazu świata, gdy miał on zaledwie 300 tysięcy lat. Dla astronomów jest tym, co kości tyranozaura dla paleontologów. Cechą charakterystyczną tego promieniowania jest jednorodność. Jego temperatura w całym Wszechświecie waha się o mniej, niż jedną tysięczną stopnia. Ta jednorodność informuje o tym, że: a/ Wszechświat za młodu był jednorodny a nie wypełniony niejednorodnymi skupiskami materii (np. czarnymi dziurami), bo to musiałoby zostawić inny ślad temperaturowy, b/ ewolucja Wszechświata przebiegała wszędzie tak samo o czym świadczy jednolitość temperatury. Ta jednorodność pozwala nam zdefiniować pojęcie czasu w odniesieniu do Wszechświata jako całości. Podobieństwo kosmicznej ewolucji w całej przestrzeni pozwala fizykom na Ziemi i w odległej galaktyce podobnie liczyć czas trwania Wszechświata. Jednorodna ewolucja oznacza, że zegary w każdym zakątku odmierzały czas prawie tak samo. Czyli, jednorodność przestrzeni gwarantuje synchronizację Wszechświata.

#### 8.4 Rozciąganie Wszechświata

To że Wszechświat się rozszerza odkryto dopiero w roku 1929 (Edwin Hubble). Im dalej od nas jest jakaś galaktyka, tym szybciej się oddala. Przy odległości 100 mln. lat świetlnych prędkość ucieczki wynosi 2,5 tys. km/sek a przy odległości 1 mld. lat świetlnych prędkość ucieczki równa się 25 tys. km /sek. Ogólna teoria względności stwierdza, że grawitacja powoduje, że przestrzeń albo się rozciąga albo się kurczy (Friedman, Lemaître). Ucieczka galaktyk nie następuje w istniejącej przestrzeni, ale jest efektem puchnięcia samej przestrzeni. Model wyjaśniający to zjawisko to np. balon z przyklejonymi na jego powierzchni monetami. W miarę nadmuchiwania wszystkie monety-galaktyki równomiernie oddalają się od siebie.

#### 8.5 Czas w rozszerzającym się Wszechświecie

W trakcie rozszerzania się Wszechświata istnieje doskonała symetria między zegarami w każdym jego zakątku. Pytanie: skoro galaktyki oddalają się od siebie z różnymi prędkościami czy ten ruch nie powinien, zgodnie ze szczególną teorią względności (STW), rozsynchronizować zegary? Otóż nie, ponieważ STW mówi o względności czasu w przestrzeni a zegary w rozszerzającym się Wszechświecie nie poruszają się w przestrzeni. Względem przestrzeni są w spoczynku. To przestrzeń się rozszerza.

#### 8.6 Nieoczywiste własności rozszerzającego się Wszechświata

a/ skoro prędkość ucieczki galaktyk jest tym większa, im są odleglejsze, bardzo odległe z nich (dalsze niż 12 mld. lat świetlnych) mogą uciekać z prędkością większą od prędkości światła. Jest to możliwe, bo STW nie limituje szybkości rozszerzania się Wszechświata. Teoria ta ogranicza prędkości, od których już odjaliśmy kosmiczną ekspansję.

b/ rozszerzanie się Wszechświata jako całości nie rozszerza ani rozmiarów naszych ciał ani rozmiarów planet czy nawet galaktyk, bo siły jądrowe i grawitacyjne, które je łączą są silniejsze niż nacisk rozszerzającej się przestrzeni.

#### 8.7 Kosmologia, symetria i kształt przestrzeni

Jaki jest globalny kształt czasoprzestrzeni? Są trzy możliwości: a/ sfera, czyli wypukły wycinek balonu, b/ przestrzeń płaska, np. nieskończony, rozszerzający się sześciąt przezroczystej gumy, c/ wklęsłe siodło. Wszystkie te kształty są nieskończone, tzn. bez granic i końców. Dwuwymiarowym nieskończonym kształtem jest np. torus. Przykładem torusa – ekran monitora, po którym płynie napis z prawej strony w lewą i w miarę znikania po lewej stronie pojawia się znowu po prawej. Faktyczny kształt przestrzeni zależy od zagęszczenia materii i energii we Wszechświecie. Jeśli gęstość ma tzw. wartość krytyczną,  $10^{-23}$  grama/m<sup>3</sup> (co się równa 5 atomom wodoru na metr sześcienny) przestrzeń jest płaska, jeśli jest większa – przestrzeń jest sferą, jeśli jest mniejsza – siodłem. Obserwacje wskazują na brak krzywizny, czyli na przestrzeń płaską.

#### 8.8 Kosmologia i czasoprzestrzeń

Obserwując kosmos wykonujemy swoistą podróż w czasie. Światło z odległych obiektów pokazuje nam je w postaci, w jakiej istniały w zamierzchłej przeszłości. Gdy patrzymy w przeszłość Wszechświata, staje się on coraz mniejszy i gęstszy. Gdy cofniemy się do dziesięciu milionowych sekundy od początku Wszechświata, będzie on tak gęsty i gorący, że zwykła materia rozpadnie się tworząc pierwotną plazmę złożoną z elementarnych składników przyrody. Gdy cofamy się jeszcze dalej zbliżając się do chwili zero, cały Wszechświat jest tak ściśnięty, że kropka na końcu tego zdania jest gigantyczna w porównaniu z nim a warunki jakie wtedy panowały tak są ekstremalne, że żadna teoria fizyczna nie umie opisać, co się wtedy działo.

## 8.9 Alternatywne kształty

Gdy cofamy się w czasie, przestrzeń się kurczy, ale jej całkowity rozmiar pozostaje taki sam. Albowiem przestrzeń jest nieskończona, co oznacza m.in., że zmniejszenie nieskończonej przestrzeni o połowę daje w wyniku wciąż nieskończoną przestrzeń.

## 9 Parowanie próżni. Ciepło, nicość i unifikacja

### 9.1 Wstęp

Przez 95% swej historii Wszechświat rozszerzał się, materia się rozrzedzała wskutek ekspansji, temperatura malała. W tym rozdziale powiemy o decydujących momentach w pierwszym ułamku sekundy po Wielkim Wybuchu.

### 9.2 Ciepło i symetria

Tuż po Wielkim Wybuchu panowały warunki ekstremalne. Zaraz potem (mówimy o czasie rzędu  $10^{-30}$  –  $10^{-35}$  sekundy), w miarę rozszerzania i ochładzania się przestrzeni, nastąpił spadek temperatury. Ten spadek ma zasadnicze znaczenie w analizie i zrozumieniu tego wczesnego okresu, albowiem odpowiednio duże zmiany temperatury powodują jakościową zmianę układu fizycznego. Zmiany te noszą nazwę przejść fazowych. Przejścia fazowe to np. przejście z lodu w wodę a z wody w parę. Przejściom fazowym spowodowanym wzrostem temperatury towarzyszy wzrost symetrii. Parę cechuje większa symetria od wody itd. Kosmos w swej najwcześniejszej historii ulegał takim przejściom fazowym, ale w odwrotnym kierunku. Kosmologiczne przejścia fazowe miały miejsce, gdy Wszechświat się ochłodził do pewnej szczególnej temperatury (por. pkt. 9.4) a „substancją”, która się wtedy „skropliła” czy „zestaliła” było pole Higgsa. Takim przejściom fazowym towarzyszył spadek symetrii.

### 9.3 Siły, materia i pola Higgsa

Istnieją cztery znane siły przyrody: pole elektromagnetyczne i jego cząstki - fotony, pole grawitacyjne i jego prawdopodobne (bo jeszcze nieodkryte) cząstki - grawitony oraz silne i słabe oddziaływania jądrowe (pole Yanga-Millsa). Cząstki oddziaływania silnego to gluony, słabego – wuony i zetony. Materię także można wyrazić jako pole: fale prawdopodobieństwa mechaniki kwantowej to pole wypełniające przestrzeń i opisujące prawdopodobieństwo, że jakaś cząstka znajdzie się w tym czy innym miejscu. Istnieje przekonanie, że istnieje jeszcze inny rodzaj pól – pola Higgsa. Nie zostały jeszcze odkryte obserwacyjnie, ale jeśli są, cały Wszechświat wypełniony jest oceanem pól Higgsa – zimną pozostałością po Wielkim Wybuchu – odpowiedzialnych za wiele własności cząstek tworzących nasze ciała i wszystko wokół.

### 9.4 Pola w ochładzającym się Wszechświecie

Pola reagują na temperaturę ja zwykła materia: im wyższa temperatura, tym szybciej oscyluje wartość pola. Jak powierzchnia wody w garnku na dużym ogniu. We Wszechświecie w  $10^{-43}$  sekundy po Wielkim Wybuchu temperatura była gigantyczna, wynosiła  $10^{32}$  kelwinów. W miarę jak Wszechświat się rozszerzał i ochładzał, wartość większości pól zbliżała się do zera. Istnieje jednak szczególne pole, pole Higgsa. Z początku fluktuuje równie gwałtownie jak inne, ale po odpowiednim spadku temperatury osiąga niezerową wartość na całej przestrzeni. Powstaje ocean Higgsa. Gdy Wszechświat się ochładza, wartość pola Higgsa zostaje uwieczniona w zagłębieniu i nigdy nie osiąga zera. Ponieważ zachodzi to równomiernie w całej przestrzeni, Wszechświat zostaje wypełniony jednorodnym i

niezerowym polem – oceanem Higgosa. Proces przyjmowanie przez pole Higgosa niezerowej wartości to tzw. proces spontanicznego łamania symetrii. Jest to jedna z najważniejszych idei w fizyce ostatniego dwudziestolecia .

#### 9.5 Ocean Higgosa i pochodzenie masy

Pole Higgosa ma niezerową wartość i odczuwamy to pole wykonując ruch przyspieszony. Wtedy wyczuwamy opór. Masa obiektu (np. ręki) jest miarą tego oporu. Ale skąd się bierze opór, czyli co nadaje przedmiotom bezwładność? Ani Newton ani Einstein nie wyjaśnili dlaczego przedmioty stawiają opór przyspieszeniom. Fizycy próbują to wyjaśnić dzięki polu Higgosa. Atomy składają się z kwarków, które z kolei połączone są cząstkami oddziaływań silnych jądrowych – gluonami. Ocean Higgosa oddziałuje z tymi wszystkimi cząstkami wyhamowując je a siła hamowania jest proporcjonalna do ich masy. Przy czym hamowanie dotyczy tylko ruchu przyspieszonego.

#### 9.6 Unifikacja w stygnącym Wszechświecie

Pole Higgosa kondensuje się, czyli powstaje w temperaturze miliona miliardów stopni ( $10^{15}$ ). Do tej temperatury Wszechświat się ochłodził w ciągu  $10^{-11}$  sekundy po Wielkim Wybuchu. Powyżej tej temperatury ocean Higgosa nie mógł powstać, bo było za gorąco. Pod jego nieobecność wszystkie znane cząstki miały masę zerową. Powstanie oceanu Higgosa to tzw. przejście fazowe: wraz ze spadkiem temperatury następuje zasadnicza zmiana wyglądu i obniżenie symetrii, w tym przypadku bezmasowe cząstki nagle otrzymują masę. Gdy były bez masy, cechowała je wysoka symetria: zamiana jednej cząstki na drugą niezauważalna a teraz już nie. W latach 60. XX wieku odkryto, że zanim nastąpiło przejście fazowe kondensujące pole Higgosa, czyli jeszcze w temperaturze powyżej  $10^{15}$  stopni Kelwina miała miejsce unifikacja pola elektromagnetycznego i słabych oddziaływań jądrowych (odpowiedzialnych za rozpad radioaktywny). Były tym samym polem (Glashow, Salam, Weinberg).

#### 9.7 Wielka unifikacja

Odkrycie zjawiska unifikacji siły elektromagnetycznej słabych oddziaływań jądrowych dało impuls do prac nad koncepcją wielkiej unifikacji (Georgi, Glashow). Bada się kiedy wszystkie cztery siły (elektromagnetyczna, silnych i słabych oddziaływań jądrowych i grawitacyjna) mogą być przejawem jednej wielkiej siły. Na razie nie ma jednoznacznie pozytywnych efektów tych prac.

#### 9.8 Powrót eteru

Ocean pola Higgosa przypomina eter. Jest wszędzie i wszystko przenika. Ale nie ma nic wspólnego z ruchem światła, nie wywiera wpływu na nic, co porusza się ze stałą prędkością. Jeśli jest (bo nie został jeszcze obserwacyjnie potwierdzony) składa się z cząstek Higgosa. Niedługo eksperymenty pozwolą zweryfikować ich istnienie.

#### 9.9 Entropia i czas

Współczesna teoria kosmologiczna pozwala uchwycić kolejność zdarzeń od Wielkiego Wybuchu i wskazać na momenty istotne, tzw. przejścia fazowe. Historia ta pokazuje, jak od stanu o niezwykle niskiej entropii tracono kolejne symetrie i entropia rosła.

### 10 Dekonstrukcja Wielkiego Wybuchu. Co wybuchło?

#### 10.1 Wstęp

W pierwszych chwilach istnienia Wszechświata gęstość materii i energii była olbrzymia i grawitacja była dominującą siłą. Ale to jest siła przyciągająca. Cóż to więc za siła rozpoczęła odpychanie i ekspansję Wszechświata? W latach 80. XX

wieku fizycy uświadomili sobie, że w odpowiednich warunkach grawitacja może działać odpychająco i to z potężną siłą. To jest podstawą kosmologii inflacyjnej, którą się zajmujemy w tym rozdziale.

#### 10.2 Einstein i odpychająca grawitacja

Z równań ogólnej teorii względności (OTW) wynika, że Wszechświat albo się kurczy albo rozszerza. Einstein nie chciał się z tym zgodzić, wierzył we Wszechświat statyczny. Uzupełnił więc równania OTW o nowy człon – stałą kosmologiczną. Jest to równoważąca grawitację (przyciągającą) siłą odpychającą. Skąd się wzięła? Według OTW wkład do siły grawitacyjnej ma nie tylko masa i odległość, ale i energia i ciśnienie. Zwykle ciśnienie jest dodatnie i powiększa grawitację przyciągającą. Ale może być ujemne i wtedy powoduje grawitację odpychającą. Dla zwykłej materii ciśnienie jest dodatnie, więc stała kosmologiczna nie może się składać ze zwykłej, znanej nam materii. Jeśli ciśnienie jest ujemne dochodzi do zmagania przyciągającej grawitacji, pochodzącej od zwykłej materii i odpychającej grawitacji pochodzącej od ujemnego ciśnienia. Einstein dobrał arbitralnie wartość stałej kosmologicznej, tak aby przyciąganie zrównoważyć odpychaniem i by Wszechświat pozostał statyczny. Po odkryciu Hubble'a (1927, Wszechświat się rozszerza) porzucił jednak koncepcję stałej kosmologicznej.

#### 10.3 O skaczących żabach i przechłodzeniu

Ogólna teoria względności dopuszcza ekspansję, ale nie tłumaczy jak się ona zaczęła. W roku 1979 Alan Guth i Henry Tye badali, co by się stało, gdyby Wszechświat się ochładzał a wartość pola Higgsa zamiast leżeć nieopodal zera została uwięziona w konfiguracji o wyższej energii. Stan ten fizycy nazywają przechłodzeniem pola Higgsa (o tym, jak pole Higgsa mogło zostać tam uwięzione, będzie mowa w pkt. 11.6 – 11.7). Okazuje się, że wtedy pole Higgsa ma jednorodne, ujemne ciśnienie i wywiera jak stała kosmologiczna wpływ na ekspansję przestrzeni.

#### 10.4 Inflacja

Tak przechłodzone i rozpychające przestrzeń ujemnym ciśnieniem pole Higgsa istnieje tylko chwilę. Przez tę chwilę jest uwięzione (jego wartość jest uwięziona) na „wzniesieniu” o wyższej energii a opadająca temperatura Wszechświata uniemożliwia mu zeskok do energii zerowej lub w jej pobliżu, bo do tego konieczne byłoby wzbudzenie termiczne (wzrost energii) a temperatura przecież spada. Jednak „aktywność własna” pola, czyli jak zawsze turbulentne procesy kwantowe powodują przypadkowe odchylenia jego wartości. Jedno takie wystarczająco duże odchylenie spowodowało sturlanie się pola Higgsa ze wzniesienia o wyższej energii ku energii zerowej. Sturlanie mogło trwać  $10^{-35}$  sekundy. Guth i Tye wyliczyli także energię i ujemne ciśnienie pola Higgsa przed sturlaniem się ku wartości zerowej (koncepcje tzw. nowej i chaotycznej inflacji, Linde, Albrecht, Steinhardt). Wartość, czyli siła rozpychająca przestrzeń okazała się  $10^{100}$  razy większa od zaproponowanej przez Einsteina. To pole Higgsa, które istniało tylko ułamek chwili po Wielkim wybuchu i było uwięzione na wzniesieniu o wyższej energii i które potężnie rozdeło przestrzeń nazwano polem inflatonowym, by odróżnić je od elektroslabego pola Higgsa odpowiedzialnego za nadanie cząstkom masy. Pole inflatonowe spowodowało tzw. inflację Wszechświata. Trwała ona zaledwie  $10^{-35}$  sekundy, ale Wszechświat w tym czasie rozszerzył się o współczynnik  $10^{30}$ ,  $10^{50}$ ,  $10^{100}$  lub nawet więcej. Po  $10^{-35}$  sekundy pole inflatonowe „odkryło” sposób, aby się ześlizgnąć ze wzniesienia o wysokiej energii i to „sturlanie” spowodowało wyłączenie siły odpychającej. W miarę jak energia pola spadała, uwięziona w nim energia była przekazywana na wytworzenie zwykłych cząstek materii i promieniowania. Od tej pory przestrzeń nadal się rozszerza i ochładza. Zjawisko inflacji jest odkryciem Alana Gutha, nosi

nazwę kosmologii inflacyjnej i jest jednym z największych osiągnięć teoretycznych nauki XX wieku.

#### 10.5 Formalizm inflacyjny

Kosmologia inflacyjna (KI) nie odpowiada na pytanie skąd się wzięło pole inflatonowe. KI jest nie tyle teorią co formalizmem zbudowanym wokół spostrzeżenia, że grawitacja może być odpychająca. Szczegóły wybuchu zależą od konkretnych założeń co do charakterystyki pola inflatonowego.

#### 10.6 Inflacja i problem horyzontu

W jaki sposób Wszechświat stał się tak jednorodny (jednolite promieniowanie tła)? W teorii Wielkiego Wybuchu (WW) było to zagadką. Ekspansja przestrzeni po WW ciągle spowalniała a więc dwa obszary obecnie poza horyzontem kosmicznym (tzn. są tak daleko od siebie, że czas od początku Wszechświata za krótki, by światło mogło między nimi przebiec) nigdy wcześniej nie mogły się ze sobą skomunikować i ujednoczyć parametrów. Jak więc się stało, że są one tak jednolite? Kosmologia inflacyjna rozwiązuje ten problem. W krótkim etapie tuż po WW ekspansja przestrzeni zachodzi z prędkością ponadświetlną, ale po  $10^{-35}$  sekundy gwałtownie zwalnia i hamuje. Taka charakterystyka ewolucyjna pozwala całemu Wszechświatowi „być ze sobą w kontakcie” i ujednoczyć parametry.

#### 10.7 Inflacja i problem płaskości

Kosmologia inflacyjna podejmuje problem kształtu przestrzeni. Ogólna teoria względności (OTW) uzależnia krzywiznę przestrzeni (wypukła, płaska, wklęsła) od gęstości materii. Równania OTW w standardowym modelu Wielkiego Wybuchu są niezwykle wrażliwe, wystarczy, by gęstość w pierwszych chwilach istnienia Wszechświata była ułamek ułamka inna od krytycznej a przestrzeń nie będzie płaska. Obserwacje Wszechświata pokazują jednak, że jego gęstość nie jest tysiące razy różna od krytycznej i kształt Wszechświata wydaje się płaski. Nie było wiadomo co zatem tak doskonale dostroiło gęstość materii na początku Istnienia Wszechświata do poziomu krytycznego, z dokładnością milionowej części procentu. Rozwiązanie problemu: tak dokładne dostrojenie jest niezbędne, tylko wtedy gdy działa grawitacja przyciągająca, bo ona zwiększa każde odchylenie od gęstości krytycznej. Grawitacja odpychająca, rozszerzająca Wszechświat, działa odwrotnie, zmniejsza wszelkie zakrzywienia. Przez analogię, można to porównać z coraz bardziej płaską powierzchnią balonu w trakcie jego nadmuchiwania. A ponieważ ekspansję zawdzięczamy grawitacji odpychającej, przestrzeń w miarę upływu czasu rozpląszcza się.

#### 10.8 Postęp i przewidywania

Dane nie do końca jednak potwierdzały przewidywania kosmologii inflacyjnej, że powinniśmy oglądać Wszechświat o gęstości krytycznej (5 atomów wodoru na  $1 \text{ m}^3$ ). Faktycznie, materia i energia obserwowalna, czyli ta, która wysyła światło stanowi zaledwie 5% gęstości krytycznej.

#### 10.9 Przewidywanie ciemności

W wieku XX znaleziono jednak dowody na istnienie materii nieświecącej (Zwicky, Rubin, Ford). Stanowi ona 25% gęstości krytycznej. Razem z materią widoczną daje to 30% gęstości krytycznej. Gdzie reszta?

#### 10.10 Uciekający Wszechświat

Po zakończeniu fazy gwałtownej inflacji Wszechświat hamuje. Pomiar tempa hamowania pozwala na ocenę ilości brakującej materii/energii. Bowiem im jest jej więcej tym bardziej Wszechświat hamuje (działa tu zwykła grawitacja przyciągająca). Należy zbadać jak szybko uciekają galaktyki, które są w różnej



odległości, co jest równoznaczne z różnymi stadiami historii Wszechświata. Pomiaru tego dokonano w latach 90. XX wieku (Perlmutter, Schmidt). Okazało się, że Wszechświat hamował przez pierwsze 7 miliardów lat a potem zaczął znowu przyspieszać. Było to wielkim zaskoczeniem dla fizyków i astronomów.

#### 10.11 Brakujące 70 procent

Wyjaśnienie różnych prędkości ekspansji: Wszechświat ma stałą kosmologiczną – siłę odpychającą. Przez 7 mld. lat była ona zdominowana przez normalną grawitację przyciągającą. Jednak w miarę rozrzedzenia zwykłej materii i zmniejszania jej przyciągania grawitacyjnego odpychająca siła zyskiwała aż wreszcie zdobyła przewagę i zaczął się nowy etap przyspieszonej ekspansji. Obliczono, że prędkość oddalania się galaktyk w tej fazie wymaga odpychania przez stałą kosmologiczną, której ciemna energia wnosi wkład równy 70% gęstości krytycznej. Daje to w sumie 100% masy/energii Wszechświata (Perlmutter, Schmidt).

Podsumowanie historii Wszechświata: we wczesnych epokach energię Wszechświata niosło pole inflatonowe o wartości różnej od stanu o minimalnej energii. Z powodu swojego ujemnego ciśnienia pole inflatonowe spowodowało gwałtowny wybuch inflacyjnej ekspansji. Następnie, jakieś  $10^{-35}$  sekundy później, gdy pole inflatonowe stoczyło się po zboczu potencjału, szybka ekspansja zakończyła się i inflacja uwolniła swoją energię, wytwarzając zwykłą materię i promieniowanie. Przez wiele miliardów lat te zwykłe składniki Wszechświata wywierały typową, przyciągającą siłę grawitacyjną i spowalniały kosmiczną ekspansję. W miarę jednak jak Wszechświat rozrastał się i rozrzedzał, przyciąganie grawitacyjne malało. Po około siedmiu miliardach lat zwykłe przyciąganie grawitacyjne stało się wystarczająco słabe, aby zaczęło dominować to odpychające.

#### 10.12 Zagadki i postęp

### 11 Kwanty na niebie. Inflacja, fluktuacje kwantowe i strzałka czasu

#### 11.1 Wstęp

Kosmologia inflacyjna rozwiązuje trzy problemy: powstanie skupisk materii takich jak galaktyki, ilość energii koniecznej do powstania Wszechświata, pochodzenie strzałki czasu.

#### 11.2 Kwantowy zapis na niebie

Skoro Wszechświat jest tak jednorodny i gładki w największych skalach (por. pkt. 8.3), skąd bierze się jego niejednorodność (czyli istnienie skupisk materii, jak np. galaktyki) w małej skali? Otóż nagły wybuch inflacyjnej ekspansji rozciągnął przestrzeń o olbrzymi czynnik (od  $10^{30}$  do  $10^{100}$  w zależności od koncepcji) i wszystko co było w skalach mikroskopowych zostało rozciągnięte do skali makro. Idzie głównie o przypadkowe zróżnicowania kwantowe, które w inflacji zostały gigantycznie powiększone. W ciągu kilku milionów lat po zakończeniu ekspansji inflacyjnej te niewielkie zaburzenia narastały dzięki przyciąganiu grawitacyjnemu. Wartość pola inflatonowego staczając się po zboczu swego potencjału osiągnęła minimum w różnych miejscach w nieco innym czasie. Te subatomowe niejednorodności w wyniku ekspansji inflacyjnej dały spore zaburzenia. Zgodnie z teorią inflacji te ponad 100 miliardów galaktyk na niebie to zaburzenia kwantowe rozciągnięte na cały nieboskłon.

#### 11.3 Złoty wiek kosmologii

Inny sukces teorii inflacji: niewielkie obserwowane zróżnicowania temperatury (czwarte miejsce po przecinku) promieniowania tła w różnych zakątkach

nieboskłonu mogą być precyzyjnie wyjaśnione mechanizmem rozciągania zaburzeń kwantowych w fazie ekspansji inflacyjnej.

#### 11.4 Stworzenie Wszechświata

Choć nie umiemy odpowiedzieć na pytanie dlaczego istnieje Wszechświat (słynne pytanie Leibniza: dlaczego istnieje raczej coś niż nic?) spróbujemy wyjaśnić skąd się wzięła cała masa/energia Wszechświata. Wiadomo, że w miarę rozszerzania się Wszechświata materia i promieniowanie tracą energię na rzecz grawitacji, podczas gdy pole inflatonowe pozyskuje energię z grawitacji. Teoria inflacji dowodzi, że materia i promieniowanie powstały pod koniec fazy inflacyjnej (czyli ułamek sekundy po Wielkim Wybuchu), gdy pole inflatonowe uwolniło zawartą w nim energię, staczając się do zagłębienia w rozkładzie jego energii potencjalnej. Pytanie: Czy pod koniec fazy inflacyjnej pole inflatonowe mogło mieć dość masy/energii do wytworzenia materii/promieniowania w dzisiejszym Wszechświecie? Odpowiedź: owszem i to bez większego wysiłku. Pole inflatonowe zeruje na grawitacji, całkowita energia przez to pole niesiona zwiększała się więc wraz z ekspansją przestrzeni rozszerzającej się pod wpływem odpychającej grawitacji. Całkowita energia pola inflatonowego rosła proporcjonalnie do objętości przestrzeni jaką to pole zajmowało. Jeśli rozmiar Wszechświata zwiększył się o czynnik  $10^{30}$  (szacunek umiarkowany) jego objętość wzrosła o  $(10^{30})^3=10^{90}$ . Energia pola inflatonowego wzrosła też  $10^{90}$  razy. Czyli na początku pole inflatonowe nie musiało mieć wielkiej energii. W zależności od modelu inflacji bryłka wypełniona polem inflatonowym mogła mieć rozmiar  $10^{-26}$  centymetra i masę od 10 kg do mniej niż grama. To wystarczyło, by powstał cały Wszechświat.

#### 11.5 Inflacja, wygładzanie i strzałka czasu

Żeby wyjaśnić strzałkę czasu musimy mieć pewność, że entropia na początku Wszechświata była niska. Bo jej późniejszy wzrost, czyli rosnące nieuporządkowanie jest stanem normalnym. Jeśli więc czas płynie do przodu i jego przebieg jest asymetryczny, na początku Wszechświata musiał być stan o niskiej entropii. Wiemy o tym stąd, że na początku jednorodny i niesłychanie gęsty Wszechświat cechowała potężna grawitacja, która sprawia, że jednorodny rozkład materii jest konfiguracją o niskiej entropii. Jednorodność zawdzięczał temu, że w krótkiej fazie inflacji odpychająca grawitacja wygładziła wszelkie zmarszczki przestrzeni (Davies, Page).

#### 11.6 Entropia i inflacja

Rozróżnijmy wybuch inflacyjny i czas tuż po nim (pamiętajmy, że mówimy o okresach rzędu  $10^{-30}$  –  $10^{-40}$  sekundy). W czasie wybuchu przestrzeń uległa rozciągnięciu a tuż potem pole inflatonowe uwolniło swoją energię wytwarzając  $10^{80}$  cząstek materii i promieniowania. Inflacja stworzyła Wszechświat o niskiej entropii: nim inflacja się zakończyła, entropia wzrosła, ale o wiele mniej niż rozmiar przestrzeni. Od zakończenia inflacji przyciągająca grawitacja zmniejsza jednorodność przestrzeni poprzez tworzenie skupisk materii (galaktyki, czarne dziury) przez co zwiększa entropię. Ale na samym początku entropia była niska i jej wzrost wyjaśnia istnienie strzałki czasu i asymetryczność czasu. Inflacja jest nieuniknionym skutkiem uwięzienia na chwilę ( $10^{-35}$  sekundy) wartości pola inflatonowego na wysokoenergetycznym wzniesieniu (pkt. 10.4). Bardzo ważne pytanie: jak prawdopodobna jest taka początkowa konfiguracja?

#### 11.7 Powrót Boltzmanna

Przedinflacyjna przestrzeń była pełna zaburzeń i zakrzywień, pole inflatonowe też było wysoce nieuporządkowane a jego wartość skakała gwałtownie (zaburzenia kwantowe). Osiągnięcie przez nie wymaganej wartości na wysokoenergetycznym

wzniesieniu jest efektem przypadkowej fluktuacji, która zajdzie prędzej czy później. Wystarczy, że nastąpi to na bardzo małym obszarze ( $10^{-26}$  cm) i wówczas zostanie zapoczątkowany proces inflacyjny. Nie ma też powodu, aby warunki zapoczątkujące inflację zdarzyły się tylko raz we Wszechświecie, w jego wczesnej fazie. Wybuchy inflacyjne mogą się trafiać co jakiś czas lecz kiełkujące nowe Wszechświaty zapewne byłyby zawsze odseparowane od naszego.

- 11.8 Inflacja i jajko
- 11.9 Niedogodność?

## Początki i unifikacja

### 12 Świat na strunie. Struktura kosmosu według teorii strun

#### 12.1 Wstęp

Można sobie wyobrazić wszechświat, w którym aby zrozumieć cokolwiek, trzeba zrozumieć wszystko. Na szczęście nasz Wszechświat taki nie jest, bo wówczas nauka nie byłaby możliwa. Powstaje poprzez stopniowe odkrywanie tajemnic świata i te cząstkowe odkrycia też są użyteczne. Zasada dotychczasowych odkryć jest taka, że każdy przełom pozwolił nam zebrać szerszy zakres zjawisk fizycznych pod mniejszą liczbą parasoli teoretycznych. Wydaje się, że kierunek wiedzie ku jednej, potężnej i nieodkrytej jeszcze teorii, która zjednoczy wszystkie siły natury i całą materię w jeden formalizm zdolny opisać wszystkie zjawiska fizyczne. Od 20 lat szukamy takiej zunifikowanej teorii. Choć nie mamy poprawnej teorii łączącej silne oddziaływanie jądrowe z oddziaływaniem elektroslabym, to trzy oddziaływania (elektromagnetyczne, silne, słabe) zostały opisane jednym wspólnym językiem mechaniki kwantowej (MK). Tylko ogólna teoria względności (OTW), czyli teoria czwartej siły (grawitacyjnej) nie daje się połączyć z probabilistycznym ujęciem teorii kwantowej. Zasadniczym więc celem programu unifikacji jest połączenie OTW i MK oraz opisanie wszystkich czterech sił za pomocą tego samego formalizmu kwantowomechanicznego.

#### 12.2 Fluktuacje kwantowe i pusta przestrzeń

W przypadku mechaniki kwantowej (MK) zasada nieoznaczoności najlepiej uosabia odejście od fizyki klasycznej. Kwantowa nieoznaczoność powoduje, że mikroświat jest terenem turbulentnym i zmiennym. To co nazywany całkowicie pustą przestrzenią (czyli obszarem bez cząstek, z polami mającymi wartość zero) jest de facto terenem kwantowych pól i fal, które co prawda uśredniają się do zera, ale gdy spojrzymy na nie w odpowiednim powiększeniu (w skali Plancka,  $10^{-33}$  cm lub poniżej) ujrzymy kocioł gwałtownych fluktuacji (Casimir, Spaarnay, Lamoreaux).

#### 12.3 Fluktuacje i wywołane przez nie konflikty

Te fluktuacje kwantowe rozgrywają się w okresach krótszych niż czas Plancka ( $10^{-43}$  sekundy - czas jakiego potrzebuje światło aby przemierzyć odległość równą długości Plancka, czyli  $10^{-33}$  cm). W takich skalach zasada nieoznaczoności czyni strukturę tak powykręcaną i zniekształconą, że tracą sens pojęcia lewo/prawo, tył/przód, góra/dół, przedtem/teraz/potem.

#### 12.4 Czy to ma znaczenie?

Jeśli użyjemy łącznie równań ogólnej teorii względności (OTW) i mechaniki kwantowej (MK) uzyskamy w odpowiedzi nieskończoność, czyli absurd. Ale czy trzeba się tym przejmować? Czy nie można stosować do analizy dużych skal ogólnej teorii względności, a do małych – mechaniki kwantowej? Można i przez dziesięciolecia tak postępowano. Jest jednak kilka powodów, aby ten antagonizm usunąć. Po pierwsze, dzielenie Wszechświata na dwie osobne części (duże i małe) jest niezręczne i sztuczne. Po drugie, są obiekty, które wymagają równoczesnego stosowania OTW i MK, np. czarne dziury – obiekty o wielkim zagęszczeniu materii/grawitacji i jednocześnie mikroskopijne. Inny i ważniejszy problem: pełniejsze zrozumienie momentu stworzenia Wszechświata. Skale są wtedy mikro (dobre dla MK), ale gęstości i masy gigantyczne (coś dla OTW). W obu przypadkach analiza wymaga połączenia OTW i MK, ale z powodu konfliktu między nimi nie można tego zrobić.

- 12.5 Mało prawdopodobna droga znalezienia rozwiązania  
 Historia teorii superstrun. 1968 – funkcja beta Eulera odkryta jeszcze w XVIII wieku okazuje się pasować do opisu silnych oddziaływań jądrowych (Veneziano). 1974 – wykrycie podstaw fizycznych tego zjawiska: trzeba założyć, że silne oddziaływanie między dwiema cząstkami jest skutkiem połączenia ich cienkim wiązaniem, jakby struną (Susskind, Nielsen, Nambu). 1984 – odkrycie Schwarza, że równania teorii strun przewidują cząstkę o masie 0 i spinie (coś jak szybkość własnego obrotu) 2. A takie cechy powinien mieć grawiton. Powstaje zatem koncepcja, by teorię strun potraktować jako kwantowomechaniczną teorię siły grawitacyjnej. Gdy pokonano problemy rachunkowe tej teorii, tzw. anomalie (Schwarz, Green) przyciągnęła ona, począwszy od lat 80. XX wieku, dużą uwagę fizyków.
- 12.6 Pierwsza rewolucja
- 12.7 Teoria strun i unifikacja  
 Model standardowy fizyki cząstek wykrył wiele rodzajów cząstek elementarnych: kwarki (6 rodzajów), cząstki przenoszące siły (5 rodzajów), elektrony (3 rodzaje) i neutrina (3 rodzaje). Teoria strun: istnieje tylko jeden elementarny składnik – struna – a całe bogactwo cząstek to różne rodzaje drgań, które może ona wykonywać.
- 12.8 Dlaczego teoria strun działa?  
 Zasadnicza nowość teorii strun: elementarnym składnikiem nie jest punktowa cząstka – punkt o zerowych wymiarach, ale obiekt mający pewną rozciągłość przestrzenną. Ta różnica ma kluczowe znaczenie dla sukcesu w łączeniu przez teorię strun grawitacji, a więc ogólnej teorii względności z mechaniką kwantową (MK). W teorii strun grawiton jest struną o wymiarach zbliżonych do długości Plancka ( $10^{-33}$  cm). Nie ma więc sensu mówić o zachowaniu pola grawitacyjnego w skalach mniejszych od długości Plancka. To bardzo ważne stwierdzenie. W modelu standardowym fizyki cząstek niekontrolowane fluktuacje kwantowego pola grawitacyjnego sięgają skal poniżej tej długości, bo cząstki mają rozmiary zerowe (choć masy mają dodatnie). Stosowanie zasady nieoznaczoności musi więc sięgać poniżej długości Plancka, ale wówczas następuje konflikt z ogólną teorią względności (OTW). Teoria oparta na strunach ma jednak wbudowany bezpiecznik. Najmniejsze składniki rzeczywistości dochodzą do skali Plancka (wymiały strun) a poniżej nie ma to już sensu. A w skali Plancka daje się jeszcze uzgodnić równania mechaniki kwantowej i ogólnej teorii względności.
- 12.9 Struktura kosmosu i rzeczywistość małych skal  
 W teorii strun, ze względu na zdefiniowanie minimalnej wielkości obiektów fizycznych (struna ma przynajmniej długość Plancka –  $10^{-33}$  m.), nie można mówić o dzieleniu przestrzeni i czasu na jeszcze mniejsze kawałki. Nie tylko więc przestrzeń ma „ziarnistą” strukturę, ale i czas. Chwile czasu nie tworzą gładkiego kontinuum, ale są gęsto upakowane z najmniejszych składowych, jaką jest czas Plancka ( $10^{-43}$  sekundy). Czy pojęcie przestrzeni i czasu poniżej tej skali traci sens pozostaje na razie otwartym pytaniem.
- 12.10 Subtelności  
 Model standardowy fizyki cząstek, który opisuje kilkanaście typów cząstek to efekt doświadczeń i odkryć teoretycznych. Został skonstruowany w latach 60. i 70. XX wieku i jest oparty w dużej mierze na mechanice kwantowej. Jest wielkim sukcesem, bo wyjaśnia wszystkie dane otrzymane w akceleratorach na całym świecie. Jego ograniczenia: nie wyjaśnia, dlaczego siły są przenoszone przez taki a

nie inny zestaw cząstek i dlatego w ogóle mamy takie a nie inne cząstki. Nie odpowiada na te pytania, bo własności cząstek są dla niego danymi początkowymi.

#### 12.11 Własności cząstek w teorii strun

W ogólnej teorii względności (OTW) masa i energia są równoważne:  $E=mc^2$  (energia równa się masie pomnożonej przez kwadrat prędkości światła). W teorii strun masa cząstki to energia jej wibrującej struny. Większa masa to szybsze i bardziej gwałtowne drgania. Cząstka bezmasowa (foton, grawiton) to struna drgająca w sposób możliwie najbardziej spokojny i łagodny. W pierwszej wersji teorii strun (teorii strun ozonowych) wzory drgań miały spiny tylko o wielkościach całkowitych: 1, 2, 3 itd. Odpowiadało to spinom cząstek pośredniczących (w oddziaływaniach pól), ale z kolei cząstki materii (np. kwarki, elektrony) mają spiny połówkowe. Z tego powodu w latach 70. XX wieku opracowano zmodyfikowaną teorię strun, która cechuje się nową symetrią: wzory drgań pojawiają się parami i ich spiny różnią się o połowę jednostki (Ramond, Schwarz, Neveu, Scherz, Olive). Związek między całkowitymi i połówkowymi wartościami spinu został nazwany supersymetrią. Narodziła się supersymetryczna teoria strun, w skrócie teoria superstrun.

Jeśli teoria strun jest poprawna, wszystkie własności cząstek należy odnaleźć w rezonansowych wzorach drgań, jakie mogą wykonywać struny.

#### 12.12 Zbyt wiele drgań

Jest kilka dużych problemów: 1/ wzorów drgań jest nieskończona liczba a cząstek tylko kilkanaście. 2/ energie tych drgań, a więc i masy są gigantyczne w porównaniu w wyliczeniach w modelu standardowym. 3/ równania teorii strun, aby zachować spójność muszą zakładać więcej, bo 9 wymiarów przestrzennych, co razem z czasem tworzy 10-wymiarową czasoprzestrzeń Wszechświata.

#### 12.13 Unifikacja w wyższych wymiarach

Dodatkowy, czwarty wymiar Wszechświata zaproponował Teodor Kaluza już w roku 1919. Uwzględnienie tego wymiaru pozwalało dokonać unifikacji dwóch znanych wtedy sił: elektromagnetyzmu i grawitacji. Był jednak problem, ani nie widzimy tego wymiaru ani nie ma żadnych dowodów na jego istnienie.

#### 12.14 Ukryte wymiary

Oskar Klein w 1926 roku stosując mechanikę kwantową (MK) zaproponował, by dodatkowy wymiar miał rozmiary zbliżone do wielkości Plancka i był jakby pętelką doczepioną do każdego punktu przestrzeni. Teoria Kaluzy-Kleina została uznana za ciekawą, ale dość szybko napotkała na nieprzewidywane problemy, nie udało się np. próba włączenia elektronu do obrazu o większej liczbie wymiarów.

#### 12.15 Teoria strun i ukryte wymiary

Różnica między teorią Kaluzy-Kleina a teorią strun: dodatkowe wymiary były w teorii Kaluzy-Kleina założeniem. Natomiast w teorii strun liczbę wymiarów przestrzennych określają obliczenia, a nie założenie, czy też hipoteza lub intuicja. I ta wyznaczona obliczeniami liczba wynosi 9 wymiarów.

#### 12.16 Kształt ukrytych wymiarów

Równania teorii strun określają także kształt dodatkowych sześciu wymiarów. Są to przestrzenie Calabiego-Yau, odkryte na gruncie matematyki jeszcze przed sformułowaniem teorii strun.

#### 12.17 Fizyka strun i dodatkowe wymiary

Dlaczego teoria strun wymaga dziesięciu wymiarów czasoprzestrzennych? Otóż w teorii tej pojawia się równanie, które wymaga, aby liczba niezależnych wzorów drgań spełniła pewien konkretny warunek. Jeśli nie jest on spełniony, matematyka

teorii strun rozpada się, a równania tracą sens. We Wszechświecie o trzech wymiarach przestrzennych liczba wzorów drgań jest zbyt mała i warunek nie jest spełniony. Jest spełniony dopiero przy dziewięciu wymiarach przestrzennych. W ten sposób teoria strun określa liczbę wymiarów przestrzennych.

#### 12.18 Struktura kosmosu według teorii strun

### 13 Wszechświat na branie. Spekulacje na temat przestrzeni i czasu w M-teorii

#### 13.1 Wstęp

Teoria strun, zdaniem wielu, nie ma pewnej fundamentalnej zasady, jak np. mechanika kwantowa, która ma zasadę nieoznaczoności a ogólna teoria względności – zasadę równoważności. Niemniej niedawne odkrycia tej teorii, zwane drugą rewolucją superstrun, budzą duże nadzieje.

#### 13.2 Druga rewolucja superstrun

W ciągu ostatnich 30 lat powstało pięć równoległych teorii strun. Jedną z istotnych różnic między nimi jest to, że niektóre analizują struny zamknięte (np. pętle), inne – otwarte a jeszcze inne - oba ich rodzaje. W 1995 roku Edward Witten odkrył zasadę łączącą wszystkie pięć teorii. Okazało się wszystkie one są różnymi sposobami matematycznego opisu jednej teorii. Witten opracował swego rodzaju słownik pozwalający tłumaczyć między sobą zdania/równania wszystkich 5 teorii. Jego teoria nosi nazwę M-teorii (Witten, Horava).

#### 13.3 Siła przekładu

Dlaczego odkrycie M-teorii jest tak ważne? M-teoria dała nam pięć tłumaczeń nieznanego oryginału. Fizycy strun często posługiwali się równaniami przybliżonymi, bo dokładne były zbyt trudne do analizy. Niektóre z tych równań dawały przejrzysty opis zjawiska, ale niekiedy były mało użyteczne. M-teoria mówi, że każdy problem opisany w jednej z teorii strun ma cztery inne tłumaczenia w pozostałych teoriach i podaje zasadę tego tłumaczenia. Stąd wiele problemów nierozwiązanych dotąd w jednej teorii strun może znaleźć wyjaśnienie w innych teoriach strun. Przed M-teorią nie wiedzieliśmy, że rozwiązania w jednych teoriach mogą wyjaśnić problemy, jakie się pojawiły w innych. Nie jest to metoda niezawodna. Czasami wszystkie pięć tłumaczeń jest nieprzejrzystych. Ale słownik M-teorii wiele pomaga.

#### 13.4 Jedenaście wymiarów

Bardzo ważnym wnioskiem M-teorii jest twierdzenie, że przybliżone równania pięciu teorii strun nie zauważyły faktu, że Wszechświat musi mieć dziesięć wymiarów przestrzennych a nie dziewięć, jak sądzono. Czyli razem mamy jedenaście wymiarów czasoprzestrzeni.

#### 13.5 Brany

Pytanie: dlaczego przy połączeniu mechaniki kwantowej i ogólnej teorii względności zastosowaliśmy struny? Przecież ich kluczowa własność, to że mają wymiary niezerowe, spełniona jest także w obiektach nie tylko jak struny - jednowymiarowych, ale i w dwuwymiarowych a także trzywymiarowych. Otóż próby sformułowania fundamentalnej teorii materii opartej na trójwymiarowych elementach były podejmowane bez powodzenia przez największych fizyków XX wieku (Heisenberg, Dirac). Pewien, choć jeszcze nie ostateczny sukces odniosła dopiero teoria jednowymiarowych strun. A odkrycie M-teorii i lawina prac następujących potem pokazała coś jeszcze bardziej niezwykłego: poza strunami istnieją też obiekty dwuwymiarowe, które nazwano membranami. Ze względu na liczbę wymiarów tych innych obiektów nazwano je dwubranami, trójbranami. Z

analiz wynika także istnienie obiektów o większej liczbie wymiarów  $p$ , byle poniżej dziesięciu. Te nowo odkryte obiekty nie zostały odkryte wcześniej, bo przybliżone równania stosowane w analizach pięciu teorii strun stają się coraz mniej dokładne, gdy opisują obiekty i procesy o dużej energii/masie a wszystkie  $p$ -brany okazały się właśnie znacznie cięższe od strun.

### 13.6 Wszechświaty – brany

Struny służące do opisu znanych cząstek są obiektami o bardzo małych rozmiarach. Jeśli jednak dostarczymy strunie coraz więcej energii, najpierw zacznie ona coraz gwałtowniej drgać, a po przekroczeniu pewnej - rosnąć i może osiągnąć rozmiary makroskopowe. Wyżej wymiarowe  $p$ -brany też mogą być duże. Jeśli brana osiągnęłaby wymiary nieskończenie duże, zdołałaby wypełnić wszystkie trzy rozciągłe wymiary przestrzenne. Tak duża trójbrana zajmowałaby całą przestrzeń, jaką znamy.

### 13.7 Czepliwe brany i drgające struny

Po ogłoszeniu odkrycia Wittena i jego  $M$ -teorii, nowego sensu nabrały wcześniejsze analizy Joe Polchinskiego. Obliczył on, że w pewnych warunkach końcówki otwartych strun (o dwóch swobodnych końcach) nie mogą się poruszać całkowicie swobodnie. Struna może wtedy drgać, ale jej końce są „złapane” czy też „uwięzione” w pewnych obszarach. Po odkryciu Wittena i po innych publikacjach zainspirowanych tym odkryciem, Polchinskiemu wydało się oczywiste, że jeśli końce otwartych strun muszą się poruszać w jakimś  $p$ -wymiarowym obszarze przestrzeni, to obszar ten musi być wypełniony  $p$ -braną. Prace Polchinskiego i Wittena stały się manifestem głoszącym drugą rewolucję superstrun. Analiza drgań strun pozwala określić własności brany. Sukces polegał na tym, że analiza obiektów o większej liczbie wymiarów ( $p$ -brany) sprowadza się do dobrze znanej, choć ciągle pozostającej w sferze hipotez, analizy strun.

### 13.8 Nasz Wszechświat jako brana

W scenariuszach z braną jako naszym Wszechświatem cząstki przenoszące oddziaływania elektromagnetyczne (fotony), oraz cząstki przenoszące silne i słabe oddziaływania jądrowe (gluony, wutony, zetony) odpowiadają drganiom otwartych strun. Struny te są, jak powiedzieliśmy w 13.7 uwięzione w branie. Mogą poruszać się w niej swobodnie, ale nie mogą wyjść poza nią. Nie możemy więc zobaczyć (widzimy dzięki fotonom) innych wymiarów przestrzennych ani innych bran. Nie możemy też ich zmierzyć lub wykryć przy pomocy badania oddziaływań jądrowych. Jedynie grawitony odpowiadają strunom zamkniętym a więc mogą opuszczać branę i do niej wracać. Tak więc inne wymiary możnaby badać dzięki sile grawitacji.

### 13.9 Grawitacja i duże dodatkowe wymiary

Prawo Newtona mówi, że grawitacja między obiektami zmniejsza się o kwadrat odległości między nimi. Jest to prawo odwrotnego kwadratu. Gdy np. odległość rośnie dwa razy, grawitacja zmniejsza się 4 razy ( $2^2=4$ ). Generalnie, siła grawitacji zależy od liczby wymiarów Wszechświata. We Wszechświecie z 4 wymiarami, dwukrotny wzrost odległości zmniejszyłby siłę grawitacji 8 razy, bo  $2^3=8$ . Zasada generalna: grawitacja słabnie do potęgi o jeden mniejszej niż liczba wymiarów przestrzennych Wszechświata. Całe nasze doświadczenie potwierdza prawo Newtona, odwrotnego kwadratu. Czy więc mamy tylko trzy wymiary? Wniosek jest nieco za pochopny, bo sprawdzaliśmy to prawo głównie w skalach kosmicznych. W skalach mikroskopowych przetestowaliśmy je z pozytywnym skutkiem jedynie do odległości 0,1 mm. Dzięki 3 siłom niegrawitacyjnym możemy badać skałę jednej miliardowej jednej miliardowej metra ( $10^{-18}$  m) i nie znaleziono żadnych dowodów na istnienie dodatkowych wymiarów. Ale w scenariuszu z braną siły



niegravitacyjne są bezużyteczne do tych poszukiwań ze względu na ich uwięzienie w samej branie. W tym scenariuszu, dodatkowe wymiary mogą mieć nawet rozmiar 0,1 mm a mimo to nie wiedzielibyśmy nic o ich istnieniu (Dimopoulos, Arkani-Hamed, Dvali).

#### 13.10 Duże dodatkowe wymiary i duże struny

Scenariusz z Wszechświatem-braną zezwala na znacznie większe rozmiary dodatkowych wymiarów niż zakładano w pierwotnej teorii strun. W M-teorii i teorii strun siła działania grawitacji, jaką obserwujemy zależy od fundamentalnej wielkości siły grawitacyjnej i rozmiaru dodatkowych wymiarów. Jeśli te rozmiary są duże, siła grawitacji lepiej się w nich rozchodzi i wydaje się przez to słabsza w znanych nam wymiarach. Tak jak grubsze rury powodują niższe ciśnienie wody, bo mają więcej miejsca, aby się rozchodzić, tak większe dodatkowe rozmiary dają słabszą grawitację odczuwalną w naszych trzech wymiarach, ponieważ grawitacja ma wówczas „więcej miejsca”, aby się rozchodzić w pozostałych wymiarach. Jeśli zatem grawitacja jest silniejsza to i struny mogą być większe. Zgodnie z niektórymi analizami niewzbudzona struna może mieć długość jednej miliardowej jednej miliardowej metra ( $10^{-18}$  m). Niby niewiele, ale i tak sto milionów miliardów więcej niż skala Plancka, gdzie pierwotnie szukano strun. A skala  $10^{-18}$  metrów to już rozmiar możliwy do wykrycia przy pomocy akceleratorów cząstek następnej generacji.

#### 13.11 Teoria strun w konfrontacji z doświadczeniem?

Struny o rozmiarach  $10^{-18}$  metra będą mogły być wykryte w Wielkim Zderzaczu Hadronów, który ma być uruchomiony w roku 2007. Będzie miał on wystarczające parametry techniczne, aby wytworzyć nawet mikroskopijne czarne dziury.

#### 13.12 Kosmologia na branie

Trwają intensywne prace nad sformułowaniem teorii kosmologicznej obejmującej nowe odkrycia M-teorii. M-teoria być może pozwoli lepiej zrozumieć jeszcze wcześniejsze chwile powstawania Wszechświata, niż czyni to kosmologia inflacyjna. Ale istnieje też bardziej radykalny pomysł na wykorzystanie M-teorii. Jest to model cykliczny powstania Wszechświata wykorzystujący scenariusz z Wszechświatem jaką braną.

#### 13.13 Kosmologia cykliczna

Jest to propozycja Steinhardta i Turoka z Cambridge University (przedtem: Tolman, Ovrut, Seiberg, Khoury, Horava, Witten). Według niej żyjemy wewnątrz trójbrany, która co kilka bilionów lat zderza się z sąsiednią, równoległą trójbraną. Zderzenie daje początek nowemu cyklowi kosmologicznemu. Każda brana ma trzy wymiary przestrzenne, czwarty stanowi odstęp między nimi a pozostałe sześć są zwinięte w przestrzeń Calabiego-Yau o takim kształcie, by drgania ich strun odpowiadały znanym rodzajom cząstek. W takiej konfiguracji druga trójbrana – inny wszechświat jest tuż obok, o ułamek milimetra. Po każdym kolejnym zderzeniu obie trójbrany oddalają się. Ich ekspansja trwa około biliona lat po czym zaczyna się faza ponownego przyciągania aż dochodzi do kolejnego zderzenia.

#### 13.14 Próba oceny

Kosmologia inflacyjna nie tłumaczy jak i dlaczego powstały warunki do rozpoczęcia inflacji. Nie została włączona do teorii strun, nie stanowi więc spójnego połączenia mechaniki kwantowej i ogólnej teorii względności. Z kolei model cykliczny nie wyjaśnia początku serii cykli ani ich końca, nie wyjaśnia jak i dlaczego Wszechświat znalazł się w konfiguracji równoległej z inną trójbraną, dlaczego jeden dodatkowy wymiar to odstęp między dwiema trójbranami a reszta jest zwinięta w przestrzeń Calabiego-Yau.

### 13.15 Nowe wizje czasoprzestrzeni

Scenariusz z Wszechświatem jako braną i cykliczny model kosmologiczny są wysoce spekulatywne. Zostały tu przedstawione, aby pokazać nowe fascynujące możliwości i zaskakujące sposoby myślenia o przestrzeni

## Rzeczywistość i wyobrażenia

### 14 W niebiosach i na ziemi. Doświadczenia z przestrzenią i czasem

#### 14.1 Wstęp

Duża część postępu w nauce, od Newtona do rewolucyjnych odkryć XX wieku jest efektem potwierdzania w doświadczeniach przewidywań teoretycznych. Od połowy lat 80. XX wieku tak daleko jednak przesuujemy granicę naszego rozumienia, że teorie wkroczyły w obszary nieosiągalne dla współczesnej techniki. Jeśli jednak wykażemy się uporem i dopisze nam szczęście, wiele najnowszych idei będzie można sprawdzić w ciągu kilku następnych dziesięcioleci: istnienie dodatkowych wymiarów, skład ciemnej materii i ciemnej energii, pochodzenie oceanu Higgsa, poprawność teorii strun itd.

#### 14.2 Einsteinowskie ciągnięcie czasoprzestrzeni

Z ogólnej teorii względności (OTW) wynika, że obracające się ciało pociąga za sobą okoliczną przestrzeń i czas. Jest to tzw. zjawisko wleczenia układów inercyjnych (Lense, Thirring, Brill, Cohen, Pfister, Braun, Schiff, Puch). Ostateczne potwierdzenie doświadczalne tego zjawiska zostanie osiągnięte za kilka lat przy pomocy satelity Gravity Probe B.

#### 14.3 Łapiąc fale

Ogólna teoria względności: masa i energia powodują zakrzywienie czasoprzestrzeni, wzbudzają fale. Wybuchy kosmiczne, np. wybuch supernowej powodują rozchodzenie się fal grawitacyjnych. Fale te nie rozchodzą się w przestrzeni, ale są zaburzeniami samej przestrzeni. Jest wiele pośrednich dowodów na istnienie tych fal, ale niebawem zostanie to zweryfikowane ostatecznie dzięki aparaturze LIGO, zbudowanej na terenie stanów Luizjana i Waszyngton w USA. Są to dwie 4-kilometrowe rury, w których umieszczone lustra spowodują zwielokrotnienie długości biegu wiązki laserowej do 800 km. Fala grawitacyjna powinna zmienić taki monitorowany dystans o jedną stumilionową rozmiaru atomu.

#### 14.4 W poszukiwaniu dodatkowych wymiarów

O ile dodatkowe wymiary są dostatecznie duże, rzędu  $10^{-20}$  metra lub więcej, będą mogły być wykryte w budowanym obecnie Wielkim Zderzaczu Hadronów. Istnienie czarnych dziur może być także potwierdzone eksperymentami w tym akceleratorze albo w budowanym obserwatorium Pierre'a Augura, o polu obserwacji liczącym wiele kilometrów kwadratowych (Shapere, Feng).

#### 14.5 Cząstki Higgsa, supersymetria i teoria strun (*str. 459*)

Wielki Zderzacz Hadronów daje też nadzieję na wykrycie cząstki Higgsa, składnika pola Higgsa oraz na zdobycie ewentualnych dowodów przemawiających za supersymetrią. Supersymetria tworzy pary z cząstek, których spiny różnią się o pół jednostki. Np. supersymetryczny elektron to selektron a supersymetryczne kwarki to skwarki. Potwierdzenie supersymetrii byłoby kolejnym krokiem w rozwoju teorii strun, która wykryła to zjawisko. Możliwości Wielkiego Zderzacza Hadronów dają również nadzieję na postęp w badaniach nad koncepcją bran.

- 14.6 Kosmiczne początki
- 14.7 Ciemna materia, ciemna energia i przyszłość Wszechświata (str. 465)  
Trwają poszukiwania cząstek, które mogą być składnikiem ciemnej materii (25% zawartości Wszechświata) i ciemnej energii (70% zawartości Wszechświata). Jest bardzo wielu hipotetycznych kandydatów, od aksjonów po zetiny. Być może są to neutrino lub cząstki supersymetryczne.
- 14.8 Przestrzeń, czas i spekulacje

## 15 Teleportacja i wehikuly czasu. Podróże w przestrzeni i w czasie

- 15.1 Wstęp
- 15.2 Teleportacja w świecie kwantowym  
Teleportacja pojedynczej cząstki jest z świetle teorii kantowej w pełni możliwa. Co do teleportacji skupiska cząstek, nie mamy żadnej wiedzy doświadczalnej, ale argumenty teoretyczne przemawiają za sukcesem takiej operacji.
- 15.3 Kwantowe splątanie i kwantowa teleportacja  
W 1997 roku przeprowadzono udaną teleportację pojedynczego fotonu wykorzystując zjawisko splątania kwantowego (Zeilinger, De Martini w oparciu o prace Benneta, Brassarda, Crapeau, Jasze, Peresa, Woottersa).
- 15.4 Realistyczna teleportacja  
Przejsie do teleportacji skupisk cząstek zdecydowanie wykracza poza wszystko co obecnie jest osiągalne.
- 15.5 Zagadki podróży w czasie  
Wiadomo, przynajmniej teoretycznie, jak wykonać podróż w przyszłość. Należy udać się w podróż przestrzenią kosmiczną z prędkością z zblizoną do prędkości światła. Jeden dzień w takiej pędzącej rakiecie będzie się równał 1000 latom na Ziemi. Podróż w przeszłość jest trudniejsza do wyobrażenia. Pojawia się znany paradoks, co się stanie ze mną, jeśli po przeniesieniu się do przeszłości zabiję moją matkę w jej dzieciństwie i nie będzie mogła mnie urodzić.
- 15.6 Zagadki z nowego punktu widzenia  
Ten paradoks oparty jest na błędzie rozumowania. Czasoprzestrzeń, w której są Twoje urodziny, istnieje niezależnie od tego, dla kogo chwila Twoich urodzin jest przeszłością (np. dla Ciebie) a dla kogo przyszłością (np. dla osoby odległej o lata świetlne od Ciebie, która zbliża się do Ziemi). Nie ma sensu mówić, że „przedtem” (np. przed Twoją wyprawą w przeszłość) czasoprzestrzeń wyglądała tak a „później” (tzn. po tej wyprawie) zupełnie inaczej. Czasoprzestrzeń po prostu istnieje. Jeśli jest w niej Twoja podróż w przeszłość, do dzieciństwa Twojej matki, to owo zdarzenie jest zapisane w czasoprzestrzeni, podobnie jak Twoje narodziny.
- 15.7 Wolna wola, wielość światów i podróże w czasie  
Wyjaśnienie powyższe musi jednak odpowiedzieć na pytanie: jeśli nie mogę w czasie podróży w przeszłość zapobiec moim urodzinom, jak to się ma do mojej wolnej woli, która właśnie chce tego dokonać? Jeśli wolna wola jest złudzeniem, nie zabijesz matki, bo coś będzie musiało stanąć temu na przeszkodzie, np. po przybyciu stracisz ochotę na zaplanowany czyn albo nie będziesz mógł matki odnaleźć albo jeszcze coś innego. Jeśli jednak wolna wola nie jest iluzją a podróże wstecz są możliwe, fizyka kwantowa oferuje inne, alternatywne możliwości rozwoju wydarzeń. Np. propozycja Deutscha odwołuje się do interpretacji mechaniki kwantowej w postaci wielu światów. Według niej każdy potencjalny rezultat

zawarty w kwantowej funkcji falowej realizowany jest w osobnym, równoległym świecie. Tak więc zabijasz swoją matkę, gdy jest ona dzieckiem, ale dzieje się to nie tylko w innym czasie, ale i w innym, równoległym wszechświecie.

- 15.8 Czy możliwe są podróże w przeszłość?  
Interesował się tym zagadnieniem Einstein, ale nie osiągnął pozytywnych wyników. Po nim inni, m.in. von Stockum i Gödel. Ostatnio nową propozycję przedstawił Kip Thorne. Są to tunele czasoprzestrzenne.
- 15.9 Przepis na wehikuł czasu z tunelu czasoprzestrzennego  
Jest to tunel łączący dwa punkty w przestrzeni wzdłuż nowego, nieistniejącego wcześniej fragmentu przestrzeni. Nie wiadomo, czy takie tunele rzeczywiście istnieją, ale ich istnienie jest dozwolone przez matematykę ogólnej teorii względności. Mogą więc być przedmiotem poważnych badań teoretycznych. Zajmował się nimi John Wheeler, ale dopiero Thorne odkrył, że takie tunele są nie tylko skrótami w przestrzeni, ale i w czasie.
- 15.10 Budowa wehikułu czasu z tunelu czasoprzestrzennego
- 15.11 Kosmiczna turystyka

## 16 Spojrzenie w przyszłość. Perspektywy przestrzeni czasu

- 16.1 Wstęp  
Najnowsze koncepcje dotyczące natury przestrzeni i czasu
- 16.2 Czy przestrzeń i czas są pojęciami fundamentalnymi?  
Wielu fizyków podejrzewa, że przestrzeń i czas nie są podstawowym składnikiem rzeczywistości, że mają źródło w innych, bardziej fundamentalnych składnikach. Określają tę możliwość mówiąc, że przestrzeń jest iluzją. Że istnieje jeszcze bardziej elementarny opis Wszechświata, nieodwołujący się ani do czasu ani do przestrzeni.
- 16.3 Kwantowe uśrednianie  
Dlaczego przestrzeń i czas mogą nie być podstawowymi składnikami rzeczywistości? Po pierwsze, choć są podstawą naszych równań i wypełniają nasze myśli, pojawiają się w wyniku procesu kwantowego uśredniania. Mikroskopowa struktura czasoprzestrzeni jest pełna zaburzeń i to co obserwujemy jako gładką, spokojną postać czasoprzestrzeni to uśredniony obraz, jak w przypadku ekranu telewizyjnego, który wydaje się gładki tylko w oddaleniu. Kwantowe uśrednianie jest przystępną interpretacją twierdzenia, że znana nam czasoprzestrzeń może być złudzeniem. Po drugie, zaburzenia kwantowe pojawiające się w bardzo małych skalach sugerują, że dzielenie czasu i przestrzeni kończy się przy długości Plancka ( $10^{-33}$  cm) i czasie Plancka ( $10^{-43}$  s). Dalej mamy coś, o czym trudno mówić jako o czasie i przestrzeni. Być może czai się tam jakiś protoskładnik, jakiś najbardziej elementarny budulec czasoprzestrzeni.
- 16.4 Geometria w tłumaczeniu  
Innym źródłem podejrzeń co do niefundamentalnego charakteru czasoprzestrzeni jest zagadnienie geometrycznej dualności. Jak wiemy, dzięki M-teorii możemy tłumaczyć jedne na drugie równania pięciu istniejących równoległych teorii strun. M-teoria tłumaczy także geometrię dodatkowych wymiarów jednej teorii na drugą. W ten sposób, w ramach jednej teorii twierdzimy, że przestrzeń Wszechświata, łącznie z dodatkowymi wymiarami ma określony kształt i rozmiar, zaś w ramach innej, równoważnej teorii mówimy co innego o tym kształcie i rozmiarach. I nie chodzi tu o równoważne przekroje czasoprzestrzeni, ale o globalną strukturę samej

czasoprzestrzeni. Gdyby czasoprzestrzeń była czymś fundamentalnym, większość fizyków spodziewałaby się, że bez względu na język i teorię opisu panuje zgoda co do geometrycznych własności czasoprzestrzeni. Skoro tak nie jest, czasoprzestrzeń może być czymś wtórnym.

#### 16.5 Entropia czarnych dziur

Czarną dziurę określają trzy własności: masa (mówi jak duża jest czarna dziura – określa odległość od jej środka do horyzontu zdarzeń, otaczającej ją powierzchni, z której nie ma powrotu), ładunek elektryczny i tempo obracania. Czarne dziury mają największą entropię wśród obiektów o danym rozmiarze. Ile jest tej entropii?

Entropia czarnej dziury (czyli miara nieuporządkowania, chaosu) jest proporcjonalna nie do jej objętości, ale (ze względu na gigantyczną grawitację) do pola jej powierzchni, a dokładnie, do obszaru jej horyzontu zdarzeń (Bekenstein, Hawking). Ponieważ nie ma większej entropii niż czarnej dziury, wniosek jest taki, że maksymalna entropia jakiegoś obszaru jest proporcjonalna do jego powierzchni. Dlaczego ten wniosek jest w ogóle istotny? Po pierwsze, daje kolejną poszlakę, że ultramikroskopowa przestrzeń nie jest ciągła, ale zatomizowana. Jeśli podzielimy powierzchnię czarnej dziury na szachownicę o kwadratach o boku równym długości Plancka ( $10^{-33}$  cm), wówczas entropia czarnej dziury będzie równa liczbie takich kwadratów. Wniosek: kwadrat Plancka jest minimalną jednostką przestrzeni, posiadającą jednostkę entropii. Nic nie może się zdarzyć wewnątrz tego kwadratu, bo każde działanie mogłoby zwiększyć entropię a to niemożliwe. W ten sposób dochodzimy z innej strony do elementarnej jednostki przestrzeni. Po drugie, jeśli maksymalna entropia jakiegoś obszaru jest proporcjonalna do jego powierzchni a nie do objętości tego obszaru, to może prawdziwe, fundamentalne stopnie swobody – cechy, które mogą spowodować nieuporządkowanie – w rzeczywistości istnieją na powierzchni tego obszaru, a nie w jego objętości. Może więc rzeczywiste procesy fizyczne we Wszechświecie zachodzą na cienkiej, odległej, otaczającej nas powierzchni a wszystko, co widzimy i czego doświadczamy, jest jedynie projekcją tych procesów. Możliwe, że Wszechświat przypomina hologram.

#### 16.6 Czy Wszechświat jest hologramem?

Taką koncepcję Wszechświata jako hologramu wysunęli na początku lat 90. XX wieku Gerard 't Hooft i Leonard Susskind. Wsparcia tej koncepcji udzielił w roku 1997 argentyński fizyk Juan Maldacena, który opracował model wielowymiarowej przestrzeni opracowując opis jej wnętrza jest równoważny opisowi jej powierzchni. Nie jest przy tym tak, że jeden z tych opisów jest pierwotny a drugi wtórny. Jest to kolejna poszlaka wskazująca, że konkretna postać czasoprzestrzeni, którą znamy jest być może tylko epifenomenem (zjawisko wtórne), który zmienia się przy przejściu z jednego ujęcia teorii fizycznej do innego.

#### 16.7 Składniki czasoprzestrzeni

Nie wiemy jeszcze dokładnie jakie są podstawowe składniki czasoprzestrzeni, ale w końcu 100 lat temu sama hipoteza atomowej budowy materii uchodziła za kontrowersyjną. Postęp dokonany od tamtej pory jest ogromny. Generalnie są dwa obiecujące kierunki poszukiwań elementarnych składników czasoprzestrzeni. Jeden pochodzi od teorii strun, drugi – od teorii pętlowej grawitacji kwantowej. W teorii strun nie udało się stworzyć takiego jej ujęcia, które nie zawiera odwołań do przestrzeni i czasu. Fizycy nazywają to ujęciem niezależnym od tła (czasoprzestrzeń jako tło, w którym zachodzą zjawiska fizyczne). Teoria strun zakłada jednak istnienie czasoprzestrzeni i jest to jeden z kilku jej największych nierozwiązanych problemów. Teorie strun i ich pochodne (jak M-teoria) zakładają poza strunami również inne obiekty jak brany. Status bran jest niejasny. Czy brana jest czymś pierwotnym czy nie? Fizycy analizując scenariusze z branami odkryli, że teoria

zawiera także zerobrany – składniki pozbawione rozciągłości przestrzennej. Na pozór jest to sprzeczne z M-teorią, która odchodzi od opisu cząstek punktowych. Jednak zerobrany pojawiają się z przyczepionymi do nich strunami i ich oddziaływaniami rządzą struny. Nie są więc tworami punktowymi, pozbawionymi rozmiarów. Fizycy Banks, Fisher, Susskind i Shenker stworzyli tzw. macierzową wersję M-teorii, w której zerobrany są fundamentalnymi składnikami. Teoria pętlowej grawitacji kwantowej powstała w latach 80. XX wieku. W swej analizie wychodzi od dużych skal, grawitacyjnych i zmierza do ku małym, kwantowym. Odwrotnie niż teoria strun. Jak powiedzieliśmy, niedociągnięciem teorii strun jest konieczność zakładania istnienia tła, czyli czasoprzestrzeni, w której wszystko się rozgrywa. Osiągnięciem pętlowej grawitacji kwantowej jest to, że jest formalizmem wolnym od tła. Nie zakłada istnienia czasoprzestrzeni. Są w niej pewne obiekty jakby przypominające struny. Obie teorie sugerują zatomizowaną strukturę czasoprzestrzeni z jakąś dolną granicą. Niewykluczone, że obie koncepcje kiedyś się połączą.

#### 16.8 Przestrzeń i kosmos

W XIX wieku na liście zjawisk badanych przez fizykę nie było spowolnienia czasu, względności równoczesności, różnych przekrojów czasoprzestrzeni, grawitacji jako zniekształcenia czasu i przestrzeni, probabilistycznej natury rzeczywistości, splątania kwantowego na dużych odległościach. W naszych czasach mamy własny zestaw nieoczekiwanych idei: ciemną energię i ciemną materię, które są dominującymi składnikami Wszechświata, fale grawitacyjne, ocean Higgsa, inflacyjną ekspansję Wszechświata, teorię strun, dodatkowe wymiary, inne obiekty jak brany. W ciągu następnej dekady coraz potężniejsze akceleratory zweryfikują wiele z tych konstrukcji teoretycznych i umożliwią im kontakt z testami doświadczalnymi i eksperymentem.