

# Kosmiczna superpanorama

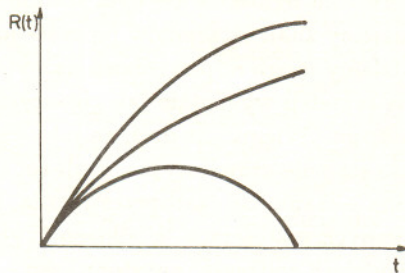
(Artykuł ten jest rozdziałem z książki przygotowywanej do druku.)

Michał HELLER

Ludziom trudno zgodzić się na cokolwiek. Jeśli w jakiejś sprawie możliwych jest kilka poglądów, to prędzej czy później każdy z nich znajdzie swoich zwolenników. Wystarczy przekartkować podręczniki historii filozofii – „tyle doktryn ile głów”. Wystarczy posłuchać politycznych dyskusji – nierzadko stanowisk jest więcej niż uczestników debaty (bo przecież polityczne poglądy można zmieniać zależnie od okoliczności). Wystarczy posłuchać rozmów w pociągu lub na ulicy – ci, co się zgadzają, na ogół milczą. W nauce również prowadzi się zacięte dysputy, ale stosunkowo często osiąga się coś bardzo przypominającego jednomyślność. Jak do tego dochodzi? Ktoś (bodaj Planck) powiedział, że nowe poglądy stają się powszechne, gdy wymiera pokolenie tych, którzy byli zwolennikami starych zapatrywań. Dlaczego jednak tylko jeden pogląd rozpowszechnia się w nowym pokoleniu?

W latach siedemdziesiątych naszego stulecia zaczął się utrwać pewien powszechny pogląd na strukturę i ewolucję świata w jego największej skali. Z czasem wręcz zaczęto mówić o standardowym modelu kosmologicznym. Standard ten obejmował, jako swoje geometryczne tło, jedno z rozwiązań równań Einsteina, przedstawiające ekspandujący świat od początkowego Wielkiego Wybuchu aż do obecnego stanu przestrzeni równomiernie wypełnionej galaktykami. Na to geometryczne tło z czasem „nanesiono” rekonstrukcję procesów, sterujących kosmiczną ewolucją. Jest rzeczą zdumiewającą, że jedynie pierwsze ułamki sekundy (o ile czas w ogóle można wówczas mierzyć jakimikolwiek jednostkami) rozmywiają się w domysłach i niepewnościach. Cała reszta, w swoich zasadniczych wątkach, odznacza się dużym stopniem wiarygodności, choć, oczywiście, pozostawia sporo otwartych możliwości i stawia szereg nowych znaków zapytania.

Trzy rozwiązania równań Einsteina, zwane rozwiązaniami Friedmana:  $t$  jest czasem odmierzającym ewolucję świata, a  $R(t)$  – tzw. czynnikiem skali; reprezentuje on typową odległość między sąsiednimi galaktykami. Według modelu standardowego jedno z tych rozwiązań z dobrym przybliżeniem przedstawia ewolucję Wszechświata.



Nie jest prawdą, że zwolennicy starych koncepcji (np. teorii stanu stacjonarnego czy symetrycznego świata Alfvena) wymarli. Żyją i niekiedy nadal usiłują propagować swoje idee. Ale u ogromnej większości fizyków i astronomów nie znajdują posłuchu. Nie należy w tym upatrywać jakiegoś gigantycznego spisku (istnieje również spiskowa koncepcja nauki!). Myślę, że można to wyjaśnić prościej i bardziej przekonująco. Po pierwsze, wymową faktów – model standardowy przeszedł pomyślnie tak wiele prób konfrontacji z obserwacjami astronomicznymi (czego nie można powiedzieć o żadnym z modeli konkurencyjnych), że musi to dawać do myślenia.

## Wbrew zdrowemu rozsądkowi (VIII)

(Według wykładów radiowych z audycji IV programu – *Widnokrąg*)

### Czy można przejść przez zamknięte drzwi?

W naszych spotkaniach opowiadam Państwu o doświadczeniach, których wyniki jawnie przeczą zdrowemu rozsądkowi pojętemu jako uogólnienie naszych doświadczeń z życia codziennego, a mówiąc ogólniej – ze świata zjawisk makroskopowych, w którym przecież sami żyjemy. Poprzednim razem omawiałem pomiary dokonane niedawno przez zespół fizyków japońskich, które wykazały, że elektron może interferować sam ze sobą, co przekładając na język codzienny oznacza, że zachowuje się on w taki sposób, jakby mógł nie dzielić się przechodząc równocześnie przez dwa otwory. Teraz proponuję zajęcie się zjawiskiem, można powiedzieć odwrotnym, zjawiskiem przechodzenia przez zamknięte drzwi bez ich otwierania. Nie jest to może aż tak dziwne zjawisko jak poprzednie. Zdolności przenikania przez mury i zamknięte drzwi wykazywali w legendarnych czasach czarownicy, wróżki i magowie. Ten gatunek istot wydaje się być na wymarciu i na co dzień nie spotykamy się ze zjawiskiem przenikania przez ściany. Opowieść o czymś takim skłonni jesteśmy uważać za bajkę lub za zjawisko nadprzyrodzone. Tymczasem cząstka alfa...

Tak zaczynając moją opowieść znowu zapraszam Państwa w świat cząstek elementarnych, w których ujawniają się prawa rządzące również nami, ale których nie zauważamy, bo jesteśmy zbyt wielcy, oczywiście, w sensie rozmiarów i masy. Tymczasem cząstka alfa... I znowu muszę przerwać i przypomnieć to, o czym mówiłem w poprzednich artykułach. Dopiero wtedy możemy ocenić niezwykłość, chciałoby się powiedzieć bezsens, niektórych zjawisk.

Otóż opowiadałem Państwu, że fala świetlna zachowuje się jak strumień cząstek, które nazywamy fotonami. Niosą one porcje energii zwane kwantami. Strumień zaś cząstek, na przykład elektronów, zachowuje się w pewnych przypadkach jak fala. Mówimy o dualizmie falowo-korpuskularnym materii. Poruszająca się cząstka z dobru

określonym pędem może zachowywać się tak, jak fala o długości równej stałej Plancka podzielonej przez pęd. Czyli: im większy pęd cząstki, tym krótsza fala. Fala kojarzy się z falowaniem czegoś, jakiegoś ośrodka. Na przykład fala na wodzie to falowanie wody. Kiedy omawiałem fale de Broglie'a, mówiłem o falach związanych z cząstką. Nie jest to dobry zwrot, gdyż sugeruje, że mamy klasyczną cząstkę podróżującą w jakiś sposób wraz z falą. Fale de Broglie'a nie są falami wędrującymi wraz z klasyczną cząstką i „wiodącymi” ją w jakimś sensie. Fale de Broglie'a i cząstka to jedna i ta sama rzecz; nie ma nic poza tym. Rzeczywiście cząstki znajdujące się w przyrodzie mają własności falowe i to jest faktem. Jeżeli chcemy, możemy mówić o fali de Broglie'a elektronu, ale zwrot ten jest w istocie synonimem elektronu.

Jeszcze raz wrócimy do doświadczenia z elektronami padającymi na przesłone z dwiema szczelinami, o którym pisałem poprzednio. Nie ma nic takiego w tym doświadczeniu, co mogłoby nam sugerować, że istnieje klasyczna korpuskuła przechodząca przez jedną ze szczelin, „prowadzona” przez falę, która przechodzi przez obie szczeliny. W zupełności wystarczy mówić o falach, których natężenia interpretowane są kwantowo-mechanicznie. Co to oznacza? Możemy to ująć następująco. W świecie bardzo drobnych składników materii, w świecie cząstek elementarnych do głosu dochodzą własności materii, które nazywamy własnościami falowymi cząstek. Zachowanie się cząstki opisuje pewna funkcja zwana funkcją falową. Kwadrat modułu tej funkcji w danym miejscu przestrzeni i czasu określa prawdopodobieństwo znalezienia tam cząstki. Kwadrat modułu funkcji to iloczyn wartości funkcji przez jej sprzężenie zespolone. W fizyce klasycznej jesteśmy pewni, że gdybyśmy tylko bardzo chcieli, to możemy się dowiedzieć, gdzie dana cząstka jest w określonej chwili i jaką w tej samej chwili ma energię. Zależy to tylko od naszej pomysłowości projektowania doświadczeń. W fizyce kwantowej niektórych pytań nie ma sensu w ogóle stawiać. Możemy tylko obliczyć prawdopodobieństwo znalezienia cząstki w danym miejscu, a pytanie, gdzie cząstka „naprawdę” się znajduje, nie ma sensu.

Wrócimy do tych problemów następnym razem, a teraz wreszcie zajmę się bardzo prostym doświadczeniem obserwacji rozpadu promieniotwórczego polonu 214. W roku 1926 opublikowano zdjęcie

Niewątpliwie najważniejszą z tych prób było odkrycie mikrofalowego promieniowania tła i jego późniejsze badania, w szczególności przez satelitę COBE. Po drugie, model standardowy do tego stopnia wrósł we współczesną fizykę, że jego usunięcie z niej spowodowałoby trudne do uleczenia rany.

Model standardowy to nie tylko imponujący obraz kosmicznej ewolucji, lecz również zbiór metod, dzięki którym stworzenie tego obrazu stało się możliwe. W metodach tych uderza niezwykła współpraca (czasem więcej niż współpraca – rodzaj swoistej symbiozy) technik obserwacyjnych i matematycznych narzędzi. Stosowane metody są nie mniej imponujące niż obraz uzyskany za ich pomocą. Ponieważ jednak metody mogą przemówić tylko do kogoś, kto w wieloletnim procesie uczenia się ich i praktykowania zetknął się z ich skutecznością, w dalszym ciągu ograniczę się tylko do obrazu. Zapraszam zatem Czytelnika do superpanoramicznego kina, w którym postaram się pokazać dzieje Wszechświata tak, jak je widzi współczesna nauka. Niech naszym ekranem będzie wyobraźnia; pamiętajmy jednak, że to, co zobaczymy, nie jest wynikiem swobodnego błędzenia imaginacji, lecz dziełem mozolnego układania szczegółów z fragmentów informacji uzyskiwanych wspólnym wysiłkiem zmatematyzowanej teorii i kontrolowanego eksperymentu.

Z pierwszymi kadrami naszego superpanoramicznego filmu mamy poważne kłopoty. Nawet nie wiemy, czy to jest film. Bo film to seria następujących po sobie, a więc rozwijających się w czasie, ujęć. A wszystko wskazuje na to, że „stan początkowy” Wszechświata nie rozgrywa się w czasie. Nic się nie dzieje, **wszystko jest**. Wszystko, co potem przejawia się w bogactwie ewolucyjnych procesów, jest zawarte w Pierwotnej Symetrii. Ale symetria ta nie stanowi pustki i martwoty; przeciwnie, jest pełna dynamiki, wręcz harmonią i różnorodnością możliwych struktur. Nie są to tylko poetyckie określenia. Jeżeli znane nam dziś teorie supersymetrii choć w części są podobne do tej Prasyetrii, której Wszechświat zawdzięcza swoją historię, to mamy prawo sądzić, że odznaczała się ona niezwykłą dynamiką i pięknem.

Ale Pierwotna Symetria nie była stabilna. Uległa złamaniu. Dopóki nie będziemy znali szczegółów jej matematycznej architektury, nie będziemy mogli odpowiedzieć na pytanie, dlaczego. Pierwsze łamanie symetrii wyglądało jak gigantyczna eksplozja – eksplozja Wszystkiego. Wiemy już dziś, że jako pierwsze z Wszystkiego wyłoniło się pole grawitacyjne, czyli to, co – na mocy równań Einsteina – stanie się czasoprzestrzenią, zgniecioną jeszcze w ogromnych gęstościach Wielkiego Wybuchu, poszarpaną w konwulsjach rodzenia, ale stopniowo – w miarę gwałtownego spadania gęstości i temperatury – przechodzącą w gładką, choć ciągle jeszcze silnie zakrzywioną, arenę fizycznych procesów.

Wyglądzenie pola grawitacyjnego odpowiada pojawieniu się czasoprzestrzeni w formie, jaką zakłada einsteinowska teoria względności. Teraz już możemy używać znanych nam pojęć przestrzeni i czasu. Zaczął się proces przemijania.

Możemy więc uruchomić kosmiczny zegar, którym będziemy odmierzać kolejne etapy historii Wszechświata. Ale wygodnie jest nie rozpoczynać odliczania czasu od godziny zero, lecz nastawić

jego wskazówki na  $10^{-44}$  sekundy i dopiero teraz zwolnić przycisk kosmicznego stopera. Czynimy to małe fałszerstwo po to, by nasze równania, które opisują ewolucję świata, ale które nie wiedzą, co naprawdę zdarzyło się na początku, funkcjonowały zgrabnie i elegancko. Dopóki nie będziemy znali teorii unifikującej całą fizykę (czyli teorii Pierwotnej Symetrii) i kwantowej teorii grawitacji, nie będziemy wiedzieli, czy świat miał początek, czy nie, a nawet, czy pytanie o jego początek ma w ogóle jakikolwiek sens. Ale wygodnie jest przyjąć, że wszystko zaczęło się od stanu z dosłownie nieskończoną gęstością (czyli od początkowej osobliwości) i przypisać temu stanowi chwilę zero (cokolwiek to znaczy). Wówczas warunki spójności (narzucone przez równania) wymagają, by uznać, że era Plancka miała miejsce  $10^{-44}$  sekundy po „początku”. W erze tej gęstość materii, panująca we Wszechświecie, jest – z naszego punktu widzenia – ciągle gigantyczna i wynosi  $10^{93}$  g/cm<sup>3</sup>, ale gwałtownie spada. Potem już wszystko toczy się gładko.

Godzina:  $10^{-35}$  sekundy. Gęstość:  $10^{70}$  g/cm<sup>3</sup>. Temperatura spada do wartości  $10^{27}$  K, co odpowiada energii  $10^{14}$  GeV. Jest to temperatura, w której następuje kolejne łamanie symetrii. Tym razem od tego, co było kiedyś Pierwotną Symetrią, oddzielają się silne oddziaływania jądrowe.

Istnieją poważne racje, by sądzić, że proces odłączania się silnych oddziaływań jądrowych istotnie wpływa na zmianę kwantowego stanu, zwanego kwantową próżnią, co z kolei powoduje gwałtowne, niejako nadprogramowe, rozdzęcie i tak już rozszerzającego się Wszechświata. Zjawisko to nazywa się kosmiczną inflacją. W ciągu małego ułamka sekundy rozmiary Wszechświata powiększają się  $10^{50}$  razy! Wszechświat gwałtownie ochładza się, ale gdy inflacja dobiega końca i ekspansja wraca do swej standardowej prędkości, następuje ponowne podgrzanie materii i wszystko toczy się dalej zgodnie ze standardowymi równaniami.

Zjawisko inflacji wyjaśnia kilka trudności standardowej kosmologii, ale samo stawia pewne znaki zapytania. Na skutek inflacji cały obecnie obserwowany Wszechświat kiedyś, w epoce ogromnego zgniecenia, stanowił mały „element objętości”. Tłumaczy to, dlaczego dzisiejszy Wszechświat jest tak dobrze „zsynchronizowany”, tzn. dlaczego jego nawet bardzo odległe od siebie części mają takie same cechy fizyczne (np. taką samą temperaturę promieniowania tła). Ale najprawdopodobniej sam mechanizm inflacji wymaga „specjalnego dopasowania” warunków początkowych. Trzeba więc odpowiedzieć na pytanie: Co wymusiło właśnie takie a nie inne warunki początkowe? A także kosmologowie bardzo chcieliby dysponować jakimiś obserwacyjnymi potwierdzeniami idei inflacji. Dotychczas pozostaje ona jedynie teoretyczną hipotezą. Hipoteza ta jest bezpieczna w tym sensie, że jej przyjęcie lub odrzucenie nie zmienia zasadniczego toku wydarzeń, jakie nastąpiły w późniejszych epokach, nie narusza więc całości standardowego modelu. Możemy zatem spokojnie powrócić do oglądania dalszych sekwencji superpanoramicznego filmu.

Godzina:  $10^{-12}$  sekundy po Wielkim Wybuchu, gęstość spada do  $10^{25}$  g/cm<sup>3</sup>, a temperatura do  $10^{15}$  K (około 100 GeV). Następuje kolejne łamanie symetrii. To, co pozostało po Pierwotnej Symetrii, rozpada się na słabe siły jądrowe i siły elektromagnetyczne.

wykonane przez K. Phillipa z urządzenia detekcyjnego, które potrafiło rejestrować tory cząstek. W urządzeniu tym umieszczono niewielką ilość pierwiastka promieniotwórczego wyodrębnionego po raz pierwszy z rudy uranowej w 1898 roku przez małżeństwo Marię Curie Skłodowską i Piotra Curie. Ściśle rzecz biorąc, do badań wzięto jeden z rodzajów, czyli izotopów tego pierwiastka, który oznaczamy liczbą 214. Komora pozwalała obserwować ślady cząstek wylatujących z polonu. Okazało się, że są to jądra helu, czyli atomy helu pozbawione elektronów. Takie jądro helu nazywamy cząstką alfa. Prawie wszystkie cząstki alfa miały dokładnie tę samą energię, którą zmierzono badając jak daleko mogą przelecieć w urządzeniu detekcyjnym. Każde pojedyncze jądro polonu użytego w tym doświadczeniu żyje średnio bardzo mały ułamek sekundy. Jest to jeden z krótkożytych izotopów polonu. Na razie nie ma nic zaskakującego.

Problem znacznie się, jeżeli zaczniemy stawiać pytania: a dlaczego energia wylatującej cząstki alfa zawsze jest taka sama? a dlaczego żyje to jądro tyle właśnie ile żyje, a nie dłużej lub krócej? Jeżeli jądro rozpada się, to dlaczego nie natychmiast, a właściwie dlaczego w ogóle istnieje taki pierwiastek, z którego jądra cząstka alfa ucieka. Aby odpowiedzieć na takie i podobne pytania, trzeba starać się wyobrazić sobie, jak to jest w jądrze pierwiastka, czyli stworzyć jakiś model.

Utwórzmy na nasz użytek prymitywny model mechaniczny. Musi on tłumaczyć wszystkie zaobserwowane fakty. Fakt pierwszy: wszystkie cząstki alfa wylatują z tą samą energią. W modelu możemy to zapewnić umieszczając każdą cząstkę alfa na końcu jednakowej i jednakowo ściśniętej sprężynki. Fakt drugi: jądro przez pewien czas istnieje, a potem dopiero wysyła cząstkę alfa. Czasową stabilność zapewnimy otaczając jądro płaszczem ochronnym, który przytrzyma sprężynkę z cząstką alfa. Dotąd idzie nam wszystko dobrze. Możemy zapewnić stałą energię wyrzucanych cząstek, jeżeli usuniemy ochronny płaszcz (jednakowo sprężynki jednakowo wyrzucają cząstki alfa), zapewnić stabilność do czasu usunięcia płaszcza, ale natrafimy na kłopot, jeżeli chcemy zapewnić również pęknięcie lub usuwanie płaszcza. Mogą Państwo zapytać, gdzie leży problem? Można sobie wyobrazić, że naprężona osłona w pewnej chwili „puści” i sprężynka wypchnie cząstkę alfa. Takiego modelu nie wolno nam przyjąć.

Co bowiem oznacza, że osłona w pewnej chwili puści? Oznacza to tyle, że w osłonie zachodzą jakieś procesy, które zmniejszają jej wytrzymałość albo, co właściwie na jedno wychodzi, że wbudowany jest w nią mechanizm zegarowy. To zaś oznaczałoby, że jądra się starzeją. Takie założenie pachnie herezją i nie wolno go zrobić. Wszystkie doświadczenia wskazują na to, że pojedyncze jądro, jak również inne cząstki mikroświata nie starzeją się i nie można przewidzieć, kiedy ta właśnie określona cząstka lub to właśnie jądro ulegnie rozpadowi. Co więc możemy zrobić w tej sytuacji?

W naszym modelu cząstek alfa umieszczonych na ściśniętych przez niezmienną wieczną ściankę osłonową sprężynkach możemy założyć, że od czasu do czasu zdarza się cud i cząstka alfa może przejść przez ściankę nie naruszając jej. Naruszyć ścianki nie wolno, bo oznaczałoby to, że ścianka zmieniła swoje właściwości i zrobiła się zdolna do przepuszczenia cząstki, a ona przecież nie może zmienić właściwości. Pozostaje więc tylko cud. Przyznają Państwo, że koncepcja modelu rozpadu promieniotwórczego opowiedziana zwykłym codziennym językiem i przyjmująca jako założenie istnienie cudów wydaje się pozbawiona sensu. O to właśnie mi chodziło.

Zwykły rozpad promieniotwórczy, jak go nazywamy: alfa-promieniotwórczy, wymaga wprowadzenia koncepcji sprzecznej ze zdrowym rozsądkiem, koncepcji przenikania przez ścianki, koncepcji nazwanej efektem tunelowym. Oczywiście, fizycy w opisie tego zjawiska posługują się nieco innym językiem. Rozumiejąc istotę zjawiska możemy przedstawić je w terminologii bardziej precyzyjnej. Na cząstkę alfa w jądrze działają siły odpychania elektrycznego związane z ładunkiem elektrycznym cząstki i siły przyciągania jądrowego. Cząstka alfa ma w wyniku działania tych sił dość znaczną energię potencjalną – chciałaby wylecieć z jądra, ale nie może tego zrobić, bo wzbraniają jej siły jądrowe, które tworzą wokół niej ściankę zwaną przez fizyków barierą potencjału. Fizyka klasyczna w takiej sytuacji stwierdziłaby, że cząstka będzie uwięziona po wieczne czasy wewnątrz bariery i nigdy nie wyleci.

Fizyka kwantowa mówi co innego. Cząstka ma własności falowe. Zachowanie cząstki opisuje funkcja falowa. Jej kwadrat w danym punkcie przestrzeni opisuje prawdopodobieństwo znalezienia cząstki w tym miejscu. W odróżnieniu od

Od tego momentu we Wszechświecie funkcjonują „niezależnie” cztery fundamentalne oddziaływania, znane współczesnej fizyce, tzn. oddziaływania grawitacyjne, jądrowe silne, jądrowe słabe i elektromagnetyczne. Ten fragment kosmicznego scenariusza nie jest już tylko teoretyczną spekulacją. Fizykom w CERN-ie koło Genewy udało się, za pomocą akceleratora, w bardzo małej objętości odtworzyć temperatury, jakie panowały we Wszechświecie  $10^{-12}$  sekundy po Wielkim Wybuchu. W takich temperaturach oddziaływania jądrowe słabe i elektromagnetyczne rzeczywiście występują jako jedno oddziaływanie fizyczne (zwane elektrosłabym).

Kolejny kadr kosmicznej superpanoramy – czas:  $10^{-6}$  sekundy po Wielkim Wybuchu, gęstość:  $10^{16}$  g/cm<sup>3</sup>, temperatura:  $10^{13}$  K. Tak „niska” temperatura pozwala już cząstkom fundamentalnym, zwanym kwarkami, łączyć się w protony i neutrony. W ten sposób rodzą się podstawowe składniki, z których zbudowana jest „nasza materia”, ale stanowią one jeszcze morze „niezależnych” cząstek, nie mogących połączyć się w jądra atomowe. Gdy tylko jakiś neutron i proton zbliżają się do siebie, chcąc stworzyć „parę”, są natychmiast rozbijane przez wszędzie obecne, gorące promieniowanie. Dopiero gdy temperatura spadnie do  $10^{11}$  K (ma to miejsce około 1 sekundy po Wielkim Wybuchu, gęstość wynosi wówczas około  $10^{10}$  g/cm<sup>3</sup>), rozpocznie się proces nukleosyntezy, czyli powstawania jąder atomowych. Proces ten w dziejach świata trwał zaledwie kilka minut, ale były to kluczowe minuty dla przyszłej ewolucji i dla naszego zaistnienia. To wówczas decydował się skład chemiczny przyszłego Wszechświata, a przecież chemia węgla to my.

W epoce nukleosyntezy świat był wielkim tygłem, w którym – jak w bombie wodorowej – wodór był spalany na hel i niewielkie ilości jąder innych lekkich pierwiastków, takich jak: deuter, lit i beryl. Jądra wszystkich innych pierwiastków powstaną potem we wnętrzach gwiazd i podczas ich wybuchów zostaną stamtąd wyrzucone w przestrzeń kosmiczną. Dokładna analiza tych procesów wykazuje, że nie wszystkie pierwiastki chemiczne mogły powstać w gwiazdach. Kluczową rolę odgrywał hel. Gwiazdy były zdolne wyprodukować jedynie około 30% helu istniejącego dziś we Wszechświecie. Pozostałe 70% jąder helu zrodziło się kilka minut po Wielkim Wybuchu. Wyniki badań rozprzestrzenienia helu i jego obfitości w obecnym Wszechświecie stanowią niezależny argument na rzecz standardowego modelu kosmicznej ewolucji.

Wszechświat rozszerza się nadal, temperatura i gęstość gwałtownie spadają. Ale ciągle jest jeszcze za gorąco i za gęsto, by mogły istnieć atomy, tzn. jądra atomowe otoczone powłokami elektronów. Gęsta mieszanina jąder atomowych silnie oddziałuje z gorącym promieniowaniem, dzięki czemu materia jest dla promieniowania całkiem nieprzezroczysta (podobnie jak obecnie wnętrze Słońca). Gęstość promieniowania przewyższa gęstość innych postaci materii i to właśnie promieniowanie rządzi dynamiką Wszechświata. Stąd też tę epokę nazywa się erą promienistą.

Sytuacja zmienia się radykalnie dopiero około 35 000 lat po Wielkim Wybuchu; gęstość materii wynosi wówczas już tylko  $10^{-14}$  g/cm<sup>3</sup>, a temperatura około 10 000 K. Następują dwa ważne wydarzenia: jądra wodoru zaczynają już wychwytywać elektrony, tworząc atomy wodoru i promieniowanie przestaje oddziaływać z cząstkami.

Od tego momentu materia, głównie w postaci atomowej, i promieniowanie elektromagnetyczne ewoluują niezależnie. Ośrodek kosmiczny staje się przezroczysty dla promieniowania. Świat wkracza w erę galaktyczną.

Promieniowanie, odłączone już od materii, ciągle stygnie na skutek rozszerzania się Wszechświata. Dziś obserwujemy je jako promieniowanie tła. Przynosi nam ono informacje z epoki, w której po raz ostatni oddziaływało z materią, jest jakby skamieliną z bardzo wczesnego etapu kosmicznej historii.

U progu ery galaktycznej gęstość materii zaczęła przewyższać gęstość promieniowania i ta ostatnia przejęła sterowanie dynamiką Wszechświata. Po wyjściu z ery promienistej materia była bardzo równomiernie rozłożona w przestrzeni (w przeciwnym razie w momencie ostatniego oddziaływania z materią promieniowanie uległoby rozproszeniu na nierównomiernościach i dziś nie widzielibyśmy go tak gładkim, jakim go obserwujemy), ale tu i ówdzie musiały istnieć pewne drobne zagęszczenia – zarodki przyszłych galaktyk i ich gromad. Resztę sprawiła niestabilność siły grawitacyjnej, czyli coraz silniejsze przyciąganie sąsiednich cząstek przez ustawicznie wzrastające zagęszczenia materii. Ale niestanna ekspansja Wszechświata, zmuszająca cząstki do oddalania się od siebie, przeciwdziałała temu procesowi. Niezmierne bogactwo struktur galaktyk, ich gromad i supergromad, obszarów pustki i nieznanych nam jeszcze konfiguracji ciemnej materii jest wynikiem gry między powszechnym ciążeniem i globalną ucieczką. Tworzy się wiele koncepcji, proponuje wiele mechanizmów, które byłyby w stanie wyjaśnić to, co astronomowie ciągle jeszcze odkrywają na niebie. Standardowy model nie jest zamkniętą strukturą...

I wreszcie kosmiczne dziś – 15 lub 20 miliardów lat po Wielkim Wybuchu; średnia gęstość materii  $10^{-31} - 10^{-28} \text{ g/cm}^3$ ; średnia temperatura panująca w międzygalaktycznej przestrzeni 2,735 K (temperatura promieniowania tła). Obraz z trudem mieszczący się na naszym superekranie. Trzeba go sklejać, jak dziecinną układankę, z kawałków dostarczanych przez teleskopy, radioteleskopy, sondy kosmiczne i satelitarne obserwatoria.

Na ekranie jeszcze tylko wykaz autorów scenariusza i ich wkładu do oglądanego filmu. Długa lista nazwisk i osiągnięć, dziwnie przypominająca spisy treści naukowych czasopism z ostatnich kilkunastu lat.

### Scenariusz ewolucji Wszechświata

	Czas	Gęstość w $\text{g/cm}^3$	Temperatura w K
Kosmologia kwantowa	????????	??????????	??????????
Era Plancka			
Oddzielenie się grawitacji	$10^{-44} \text{ s}$	$10^{93}$	$10^{33}$
Oddzielenie się silnych oddziaływań jądrowych – inflacja	$10^{-35} \text{ s}$	$10^{70}$	$10^{27}$
Oddzielenie się słabych oddziaływań jądrowych i elektromagnetycznych	$10^{-12} \text{ s}$	$10^{25}$	$10^{15}$
Powstanie protonów i neutronów	$10^{-6} \text{ s}$	$10^{16}$	$10^{13}$
Nukleosynteza	kilka minut	$10^{10} - 10^1$	$10^{11} - 10^9$
Koniec ery promienistej – początek ery galaktycznej	35 000 lat	$10^{-14}$	$10^4$
Era obecna	15–20 mld lat	$10^{-31} - 10^{-28}$	2,735

fizyki klasycznej w każdym praktycznie miejscu przestrzeni możemy obliczyć prawdopodobieństwo znalezienia tam naszej cząstki. W fizyce klasycznej cząstka albo jest, albo jej nie ma. Mówienie o prawdopodobieństwie nie miałoby sensu. Rozpad jądra jest jednak zjawiskiem kwantowym. Możemy więc obliczyć, jakie jest prawdopodobieństwo, że cząstka znajdzie się poza barierą potencjału. Jeżeli to prawdopodobieństwo jest różne od zera, to kiedyś cząstka tam się znajdzie. Czyli znajdzie się poza naszą ścianką, czyli mówiąc uczenie, poza barierą potencjału. Zaobserwujemy efekt tunelowy. Cząstka znajdzie się poza jądrem i wyleci z prędkością odpowiadającą jej energii potencjalnej, jaką miała w jądrze. Nie pytajcie mnie Państwo, jak przeszła przez barierę potencjału. Nie wiem nawet, czy jest sens mówić, że przeszła. Przecież procesu przechodzenia nie obserwujemy. Wiemy tylko, że znalazła się poza jądrem i została zarejestrowana w urządzeniu detekcyjnym. Nie każdy rozpad związany jest ze zjawiskiem tunelowym. Rozpad polonu 214 zachodzi właśnie poprzez zjawisko tunelowania. Jest to jeszcze jedno zjawisko, które trudno sobie wyobrazić na gruncie fizyki klasycznej. Chociaż nie mam tak całkiem racji. Zaczęłam przecież opowieść o tym zjawisku od stwierdzenia, że wróżki mogły tego dokonać. Czyli wyobraźnia ludzka dopuszczała już dawno możliwość przenikania przez przeszkodę. Jeżeli mogą dokonać tego cząstki alfa przez barierę potencjału, to czy my nie możemy tego samego dokonać przenikając przez ścianę mieszkania. Czasem byłoby to nawet wygodne... Prawa kwantowe obowiązują i nas. Niestety, stała Plancka jest bardzo, bardzo mała, więc efekty kwantowe są bardzo mało prawdopodobne. Odradzam więc bicie głową o mur w nadziei, że przenikniemy go kwantowym efektem tunelowym.

Pan Janusz Karkut,  
ul. Tysiąclecia 21a/28,  
13-300 Nowe Miasto Lubawskie,  
oferuje sprzedaż wszystkich  
dotychczas wydanych,  
oprawionych roczników *Delty*.

Odpowiedzi na quiz  
z *EPSILONA*:

1a 2a 3d 4b 5c 6a 7c 8d 9a 10a