

Wstęp



Na przedmiot badań kosmologii, Wszechświat, można patrzeć z tylu różnych punktów widzenia! Dla współczesnych kosmologów-observatorów, pogrążonych w żalu po niespodziewanym stwierdzeniu zamglenia wzroku u kosztownego satelity-observatorium Hubble'a, jest przede wszystkim Wszechświat zbiorem różnorodnych struktur, z których najważniejsze są wielkoskalowe: galaktyki i ich gromady. Kosmolog-teoretyk będzie we Wszechświecie widział efekt kwantowej kreacji sprzed kilkunastu miliardów lat; fenomen egzotyczny, posłuszny jednak prawom fizyki – tym znanym i tym jeszcze nie odkrytym. Albo inaczej: rozszerzający się Wszechświat jako swój własny zegar, określający tzw. kosmologiczną strzałkę czasu. Dla matematyka będzie to po prostu rozwiązanie równań grawitacji Einsteina – Wszechświat jako dynamiczna czasoprzestrzeń, której ewolucję, w szczególności końcowy los, określa jej materialna zawartość. Nawet tak, zdawałoby się, wzniosłe stwierdzenie – „Wszechświat to nasz dom” – może jednak być źródłem dość konkretnych wniosków na temat jego struktury i historii, która, ze względu na niewątpliwy fakt naszego istnienia, nie może być całkowicie dowolna (tzw. zasada antropiczna).

W tym artykule nasz wybór porównania może się wydać z początku dość pośpolicie i szkolnie: „Wszechświat jako naczynie z tłokiem”; materialna zawartość wypełniająca zmienną w czasie objętość, która wciąż reaguje ze sobą. W istocie jednak naczynie to okaże się jedynym w swym rodzaju „ostatecznym laboratorium”, potężnym akceleratorem, nieosiągalnym dla fizyków w żadnej przewidywalnej przyszłości, który testuje prawa fizyki fundamentalnej.

Skrócony kurs kosmologii wczesnego Wszechświata

Na użytek dalszej części podamy teraz kilka wiadomości z pogranicza kosmologii oraz dość egzotycznej fizyki, zwanej bardziej wzniosłe fizyką procesów fundamentalnych lub po prostu fizyką wysokich energii albo wreszcie konkretnie – fizyką cząstek elementarnych. Będzie to wykład w miarę dyletancki, za to zwięzły i dość współczesny.

Ekspansja Wszechświata. Wszechświat rozszerza się. Tę podstawową o nim prawdę znamy dobrze od czasów systematycznych badań Hubble'a (1929), ale odkrycia oddalania się galaktyk dokonał kilkanaście lat wcześniej Vesto Slipher. Nie nazwał tego jeszcze ekspansją Wszechświata. Na posiedzeniu Amerykańskiego Towarzystwa Astronomicznego w roku 1914 stwierdził ostrożnie, że „na ogół galaktyki uciekają od Drogi Mlecznej”. Rozszerzający się Wszechświat, zupełnie podobnie jak zwykle naczynie z gazem, ochładza swą zawartość; kiedyś musiał zatem być znacznie mniejszy i gorący.

Temperatura Wszechświata. Dobrze (zdawałoby się) znane pojęcie temperatury kojarzy się zwykle z fizjologicznym odczuciem ciepła czy zimna. Dla zastosowań kosmologicznych potrzebna nam będzie znaczna ekstrapolacja tego pojęcia w zakresy zupełnie obce naszej intuicji oraz przekraczające możliwości wszelkich termometrów.

W związku z temperaturą należy tu wspomnieć o trzech efektach fizycznych.

- Pierwszy z nich jest dość oczywisty. W miarę wzrostu temperatury materia ulega rozpiciu na coraz bardziej elementarne składniki. Jako pierwsze, najstabsze, ulegają rozpiciu atomy (przy temperaturze około 0,3 eV). Elektryki oddzielają się od jąder atomowych, powstaje plazma. W dalszej kolejności zachodzi rozpad jąder atomowych na ich składniki, protony i neutrony (100 keV). Na koniec z protonów i neutronów uwalniają się kwarki (200 MeV).

- Drugie zjawisko jest nieco bardziej egzotyczne, chociaż również dobrze poznane. Spróbujmy cofać się w myśli w czasie. Objętość Wszechświata maleje; maleją również odległości między galaktykami. Jest nieco mniej oczywiste, że zmniejsza się także długość fali każdego fotonu, że są one „sprężane”. Ale mniejsza długość fali oznacza większą energię ($E \sim 1/\lambda$). Energia ta, w dobrze określonych chwilach, przekraczać będzie energie spoczynkowe rozmaitych, coraz cięższych cząstek elementarnych. W chwili, w której energia fotonu staje się równa masie jakiejś cząstki materii (razy kwadrat prędkości światła), może zachodzić zjawisko zwane *kreacją par* (odwrotną anihilacją): cząstki i antycząstki danego rodzaju powstają parami z promieniowania i przebywają z nim w równowadze. Oznacza to, że jeśli nawet w wyniku spotkania ze sobą ulegają anihilacji, to średnio tak samo szybko następuje ich odtwarzanie z promieniowania.



Rozwiązanie zadania M 610.

Gdy wielościan ma tylko ściany trójkątne, to liczba krawędzi jest równa $\frac{2}{3}$ liczby ścian, a więc dzieli się przez 3 i wobec tego nie jest równa 7.

Gdy chociaż jedna ze ścian jest n -kątem, dla $n \geq 4$, to liczba krawędzi jest równa co najmniej $2n$, a więc co najmniej 8.

Czytelnik potrafi zapewne wskazać wielościan mający dokładnie k krawędzi dla każdej liczby $k \geq 6$ różnej od 7.



Rozwiązanie zadania M 611.

Symetria względem prostej łączącej środki odcinków AB i CD przeprowadza A na B , B na A , C na D i D na C , co daje tezę.

$ABCD$ jest zatem trapezem lub czworokątnem mającym oś symetrii. Warto zauważyć, że czworokąt może wobec tego mieć jedną lub trzy osie symetrii, albo nie mieć ich wcale.



Rozwiązanie zadania M 612.

Gdyby każda średnica z zabrudzonym końcem miała drugi koniec czysty, symetria względem środka kuli przekształciłaby zabrudzoną część kuli na czystą, co wobec rozmiarów części zabrudzonej jest niemożliwe.



Rozwiązanie zadania F 819. Niech q , r oraz Q i R oznaczają ładunek oraz promień odpowiednio małej i dużej kropli. Wobec tego $Q = nq$; sumując objętości kropelek mamy:

$$\frac{4}{3}\pi R^3 = n \frac{4}{3}\pi r^3 \Rightarrow R = n^{1/3} r.$$

Potencjał dużej kropli jest równy

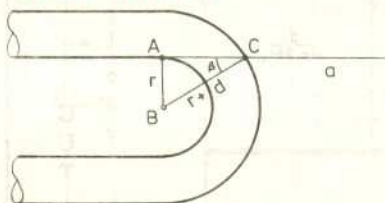
$$\phi = \frac{kQ}{R} = \frac{knq}{n^{1/3}r} = n^{2/3} \frac{kq}{r},$$

gdzie $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$. Podstawiając wartości liczbowe ostatecznie otrzymujemy

$$\phi \approx 21,5 \text{ V}.$$



Rozwiązanie zadania F 820. Aby światłowod spełniał swoje zadanie, światło nie może opuścić światłowodu. We wszystkich punktach musi więc następować zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia, tj. $\sin \beta > \frac{1}{n}$, gdzie β jest kątem padania (na ściankę światłowodu). Najbardziej ostry kąt ze ścianką światłowodu tworzy promień biegnący po prostej a .



Rozważając trójkąt ABC dostajemy

$$\sin \beta = \frac{r}{r+d} > \frac{1}{n},$$

stąd ostatecznie

$$r > \frac{d}{n-1}.$$

Ponieważ dla promienia a sytuacja jest najbardziej niekorzystna, więc warunek powyższy zapewnia całkowite odbicie wewnętrzne dla całej wiązki światła.



Inaczej mówiąc, dla każdego typu cząstek elementarnych można wskazać w historii Wszechświata taki moment (i odpowiadającą mu energię progową), że dla wszystkich chwil wcześniejszych cząstki te występowały tak obficie, jak fotony. Nawet więcej, nie różniły się zasadniczo od fotonów.

• Trzecie, potrzebne nam, zjawisko jest jeszcze bardziej subtelne. Nosi ono nazwę *odtworzenie symetrii w wysokich temperaturach*. Chodzi tu o symetrię sił przyrody, tę fundamentalną ich cechę, która wręcz siły te określa, i która w postaci magicznego słowa-klucza *gauge* (cechowanie) przenika całą współczesną fizykę. W przypadku ewolucji Wszechświata i jego stopniowego ochładzania się mówimy o zjawisku odwrotnym, o kolejnych *złamaniach symetrii*. Ze względu na pewne formalne podobieństwa używa się też określenia „przejścia fazowe”.

By zrozumieć istotę tych zjawisk, w szczególnym kontekście wczesnego Wszechświata, można podać prostą analogię korzystając z dobrze znanego zachowania się materii. (Przykład ten pochodzi z książki Jamesa Trefila *The Moment of Creation*). Wyobraźmy sobie trzy, niewątpliwie różne ciecze: rtęć, alkohol i wodę. W zwykłych temperaturach zachowują one swe różne charaktery, ale w temperaturze kilkuset stopni wszystkie one są w stanie gazowym; tworzą jednorodną mieszaninę, której żaden ze składników nie ujawnia swej indywidualnej tożsamości. Jest to jednocześnie stan najwyższej *symetrii* układu.

W miarę obniżania się temperatury następują kolejne przejścia fazowe, skroplenia. Jako pierwsza ze stanu pierwotnej symetrii wyłame się rtęć ulegając skropleniu; pozostałe dwa składniki będą jeszcze przez jakiś czas nierozróżnialne. Potem do rtęci dołączy woda, na koniec alkohol. Ostateczny stan, stan zupełnie złamanej symetrii, to trzy oddzielne, łatwo rozróżnialne ciecze.

Jest rzeczą niezwykłą, że w podobny sposób zachowują się znane nam oddziaływania. Początkowo, „tuż po stworzeniu”, jak przypuszczamy, Wszechświatem rządziła jedna uniwersalna siła. W miarę rozszerzania się kolejne siły oddzielały się z tej pierwotnej „mieszaniny” zyskując swą, znaną nam z dzisiejszej fizyki, tożsamość. Tę tożsamość określa m.in. charakterystyczna stała sprzężenia, zasięg (nieskończony lub ograniczony), rodzaj ładunków. Ale głównym sprawcą tych przemian jest temperatura.

Fizyka cząstek elementarnych

Zawartość Wszechświata to różnorodność różnych typów cząstek zwanych elementarnymi. Nazwy tej nie należy traktować zbyt dosłownie. „Tak naprawdę” to są tylko dwa rodzaje tych cząstek: cząstki materii (fermiony) oraz cząstki przenoszące siły pomiędzy nimi (bozony).

Cząstki te oddziałują wzajemnie różnymi siłami. Istnieje dobrze sprawdzony, pozwalający na dokonywanie obliczeń, i stąd powszechnie przyjęty w fizyce, opis tych sił. Mówimy, że cząstki przyciągają się lub odpychają przez wymianę innych cząstek, tzw. *bozonów pośredniczących*. Dla nas będzie tu ważny pewien aspekt tego opisu: bozony pośredniczące zmieniają tożsamość oddziałujących cząstek. Mamy obecnie dość poważne podstawy, by sądzić, że nawet bardzo różne typy cząstek mogą przechodzić w siebie, ale ceną takiej metamorfozy jest masa wymienianego bozonu: im bardziej egzotyczna metamorfoza, tym cięższy bozon. „Cięższy” należy tu rozumieć jako trudniej dostępny, trudniejszy do odtworzenia z promieniowania wskutek odwrotnej anihilacji czy w jakiś inny sposób.

Obraz ten, pozornie mniej naturalny niż znana koncepcja oddziaływania na odległość prowadząca do klasycznego pola, sprawdził się doskonale dla wszelkich sił z wyjątkiem grawitacji.

Można zatem, jako swego rodzaju ogólną zasadę, sformułować następującą prawidłowość:

W miarę cofania się w czasie materia ujawnia swe coraz prostsze składniki. Wzrost temperatury sprawia, że pojawiają się coraz cięższe bozony pośredniczące, dzięki którym różnice między dotychczas różnymi cząstkami zanikają. W szczególności – jest to tylko (pożądane ze względu na swą estetykę) przypuszczenie – „tuż po” kreacji we Wszechświecie występował zaledwie jeden typ cząstek rządzony jedną uniwersalną siłą opisaną hipotetyczną Teorią Wielkiej Unifikacji (GUT).

Przyglądając się ponad stuletniej już tablicy pierwiastków Mendelejewa nie sposób powstrzymać się od uczucia satysfakcji z jej wewnętrznej spójności oraz od przekonania, że jest to dobrze odgadnięta prawidłowość przyrody. Ale analogiczna

kontemplacja współczesnych tablic cząstek elementarnych (a więc bytów, zdawałoby się, dużo bardziej fundamentalnych niż atomy) wywołuje uczucie frustracji połączonej z podziwem dla tych, którzy tablice te kompilowali i wciąż na nowo kompilują. Podziw dla cierpliwości tych wszystkich, którzy cierpliwie śledzą trajektorie cząstek, lecz także podziw dla hojności tych, którzy nie rozumiejąc istoty problemów, rozrzutnie finansują ogrom tych badań.

Streszczenie najistotniejszych cech najbardziej elementarnych składników materii (spin 1/2), jak również nośników sił pomiędzy nimi (spin 1), zawiera poniższa tabelka. Jest to w jakimś sensie odpowiednik szacownej tablicy Mendelejewa. Zawiera ona niewiele elementów i, jak się zdaje, jest dość kompletna. (Brakuje tam „tylko” hipotetycznych cząstek o spinie 3/2, grawitonu o spinie 2, a nade wszystko kwantu fundamentalnego pola skalarnego, upragnionego bozonu Higgsa o spinie 0, czyli brakującego, a niezbędnego elementu tak, skądinąd, udanej teorii Weinberga-Salama.)

„Mała Tablica Mendelejewa”

nazwa	→	elektron
symbol	→	e
masa [MeV]	→	0,511

spin 1/2 fermiony			spin 1 bozony				
			foton γ 0	gluon g 0	bozon W W^\pm 80 600	bozon Z Z^0 91 100	bozon GUT X $10^{10}?$
neutrino taonowe ν_τ 0	neutrino mionowe ν_μ 0	neutrino elektronowe ν_e 0	0	0	$\frac{e}{\sin \Theta_w}$	$\frac{2e}{\sin 2\Theta_w}$	l e p t o n y k w a r k i ← G U T ←
tau τ ~ 1784	muon μ 105,8	elektron e 0,511	-1	0			
kwark top t ≥ 89000	kwark powabny c ~ 1500	kwark górnny u ~ 5	$+\frac{2}{3}e$	g_s	$\frac{e}{\sin \Theta_w}$	$\frac{2e}{\sin 2\Theta_w}$	
kwark piękny b ~ 4600	kwark dziwny s ~ 150	kwark dolny d ~ 5	$-\frac{1}{3}e$	g_s			

Na skrzyżowaniu wierszy opisujących fermiony i kolumn opisujących bozony podane zostały wartości stałych sprzężenia bozonów z fermionami (e oznacza tu ładunek elementarny). Strzałki w kolumnie bozon W i X oznaczają, że w oddziaływaniu z nimi cząstki z połączonych wierszy przechodzą jedne w drugie.

Pierwsze kilkanaście miliardów lat

Według naszych obecnych poglądów cały Wszechświat rozszerza się tak, jak mu nakazują równania Einsteina. Równania te to potworna maszyna matematyczna dla urodzonych masochistów umysłowych. Laikom wystarczy informacja, że geometria Wszechświata i jej ewolucja zależy od jego materialnej zawartości. Wybierzmy zatem jakąś najprostszą (symetryczną) trójwymiarową geometrię i wrzucmy do niej zawartość powyższej tabelki. Puśćmy to wszystko w ruch zgodnie z równaniami Einsteina (materia zakrzywia czasoprzestrzeń i sama porusza się po najkrótszych liniach w tak zakrzywionej przez siebie czasoprzestrzeni). Wynik tej dość brutalnej operacji to tzw. model standardowy, lub, jak się to niekiedy mówi, scenariusz zdarzeń, jakie, mamy nadzieję, zaszły kiedyś we Wszechświecie.

Poniższa tabela jest skróconą kompilacją rozmaitych liczb i zjawisk rozproszonych po najnowszej literaturze; danych nie zawsze ze sobą zgodnych i bynajmniej – zwłaszcza im bliżej górnej ramki – nie ostatecznych, a raczej dość prowizorycznych. Zaznaczyłem tam tylko zupełnie podstawowe epizody ewolucji, jak również coś, co nazwałem „logiką ewolucji”. Każdą z wymienionych haseł to temat (przynajmniej) na duży, fachowy artykuł przeglądowy. Nie twierdzą, że wybrałem wszystko, co ważne. Zorientowani



Czytelnicy zechcą dopisać brakujące epizody. Chodziło mi tu w zresztą głównie o stwierdzenie niewątpliwego już dzisiaj faktu: zaborcza kosmologia wchłonęła właściwie wszystkie głębokie koncepcje fizyki. Patrząc na ten skrócony przewodnik po wczesnym Wszechświecie nie ulegajmy jednak pokusie zachłyśnięcia się dumą z naszej wszechwiedzy. Od chwili oznaczonej jako „1 sekunda” wstecz wiele może się jeszcze zmienić, a brakujące do tajemniczej „chwili zero” 10^{-43} s to nie tak znów mało, jeśli zważyć, kiedy i w jak ekstremalnych warunkach wszystko to się działo.

Główne etapy ewolucji Wszechświata

Czas	Temperatura	Zjawisko, Era ewolucji	Materia	Oddziaływania	Logika ewolucji
		kwantowa kreacja „z niczego”?	pusta próżnia kwantowa		Etap I
		pierwotna symetria	jeden rodzaj cząstek „fermio-bozonów”, jedna siła • supergrawitacja?		Obniżanie się temperatury od 10^{32} K do 10^{15} K i stąd odchodzenie od pierwotnej symetrii:
10^{-43} s 10^{19} GeV		* oddzielenie grawitacji Teorie Wielkich Unifikacji (GUT)	„kwarko-leptony” bozony X	dwie siły: • grawitacja • silno-elektrosłabe	1. rozdzielenie oddziaływań, (łamanie symetrii w niskich temperaturach)
10^{-35} s 10^{15} GeV		* oddzielenie sił jądrowych (inflacja Wszechświata) Model Standardowy	kwarki leptony bozony W, Z	trzy siły • grawitacja • silne • elektrosłabe	2. różnicowanie cząstek elementarnych (w niskich temperaturach zanikają bozony pośredniczące).
10^{-10} s 100 GeV		* oddzielenie sił słabych	plazma kwarkowo-gluonowa	cztery siły • grawitacja • silne • słabe • elektro-magnetyczne	Etap II
$\approx 10^{-5}$ s 200 MeV		Era kwarków. • powstanie hadronów (uwięzienie kwarków)	elektrony neutrino fotony nukleony		Dalszy spadek temperatury od 10^{12} K do 2, 7 K.
3 minuty 100 keV		Era leptonów • powstanie lekkich jąder (nukleosynteza)	plazma: jądra elektrony fotony		W takich warunkach rozmaite siły łączą różne cząstki w trwałe, coraz większe i bardziej złożone struktury: hadrony, jądra atomowe, atomy, cząsteczki, ..., gwiazdy, galaktyki.
$\approx 10^5$ lat 0,3 eV		Era plazmy • powstanie wodoru (rekombinacja)	atomy		
$\approx 2 \cdot 10^{10}$ lat		Era materii teraz	galaktyki		

Nie należy zapominać, że za tym wszystkim stoją omylni ludzie różnych temperamentów i upodobań: astronomowie-observatorzy i fizycy wysokich energii; geniusze honorowani Nagrodą Nobla i ci mniej wszechstronni, niekiedy wręcz przyypadkowi odkrywcy; ekscentrycy chodzący swoimi drogami i pracownicy rzemieślnicy; wreszcie wirtuozowie matematyki i wyrobnicy od teleskopów z kamerami CCD i komputerów. Zaprezentowane zestawienie to ich wspólna, wciąż na nowo pisana, Historia Wszechświata. Czas pokaże, jak sam Wszechświat osądzi ich dzieło, co będą zmuszeni zmienić, a co dopisać.

Nie wszyscy ze znanych fizyków ulegli pokusie kosmologicznej mody w fizyce. Wielki Richard Feynman, w swych wykładach z 1984 r., określił obecny stan teorii unifikacyjnych jako *super-duper*: wielka lipa. (W języku polskim nie można oddać rymu, ale mamy za to niezamierzoną grę słów.)

Trzeba pamiętać, że podstawą wszelkich zjawisk wymienionych w tabeli jest znacznie skromniejsza i bardziej oszczędna, i estetyczna „Mała Tablica Mendelejewa”. Po prostu zastosowano ją do szczególnego kontekstu Wszechświata.

Z tabeli tej, która z pewnością zasługuje na chwilę kontemplacji, jedno nie powinno ulegać wątpliwości: całą ewolucję Wszechświata zdaje się przenikać pewien nieprzypadkowy sens. Ocierający się o granice obecnej fizyki Początek Świata zdaje się stanowić gorące stadium powszechnej prostoty, symetrii i unifikacji. Tuż potem ekspansja, powodująca spadek temperatury, sprawia, iż następują trzy kolejne akty różnicowania oddziaływań; te zaś z kolei umożliwiają trzy akty połączeń w strukturze materii. Powstaje obecny, bogaty w struktury, daleki od prostoty, olbrzymi i chłodny Wszechświat – nasz dom.