

# Początek Wszechświata

Dr Michał JAROSZYŃSKI

Wszechświat to wszystko to, co nas otacza, co, przynajmniej w zasadzie, możemy obserwować. Zaczniemy od opisu jego obecnych własności, które są istotne dla badania jego przeszłości. Okazuje się, że jest tu potrzebna bardzo niewielka ilość informacji.

Ważny jest rozkład materii we Wszechświecie i jej ruch. Ten pierwszy można z grubsza opisać, podając rozmieszczenie największych obiektów astronomicznych — gromad galaktyk.

Wewnętrzna struktura tych obiektów nie wpływa na dynamikę Wszechświata jako całości.

Obserwacje astronomiczne wskazują na to, że rozmieszczenie gromad galaktyk jest równomierne, czyli prawdopodobieństwo wystąpienia gromady galaktyk w dowolnym miejscu przestrzeni jest takie samo. W tym sensie Wszechświat jest jednorodny.

Jeśli patrzeć na obiekty pozagalaktyczne w dowolnym kierunku, okaże się, że ich ilość i charakterystyki są, średnio biorąc, stałe. Niezależność cech Wszechświata od kierunku obserwacji nazywamy jego izotropią. 50 lat temu amerykański astronom E. Hubble zaobserwował, że odległe galaktyki (i ich gromady) oddalają się od naszej. Prędkość ich ucieczki jest proporcjonalna do odległości od Ziemi (czyli od obserwatora). Tym samym wykryta została ekspansja Wszechświata, a opisujące ją prawo nazwane zostało prawem Hubble'a.

Zauważymy tutaj, że przy ekspansji opisanej prawem Hubble'a Wszechświat nie traci jednorodności. Co więcej, obserwator w każdym punkcie przestrzeni zaobserwuje ekspansję zgodną z prawem Hubble'a.

Niezwykle ważna dla kosmologii informacja uzyskana została w roku 1965. Odkryto wówczas obecność docierającego do Ziemi ze wszystkich kierunków promieniowania elektromagnetycznego o długości fali rzędu milimetrów i widmie Plancka. Natężenie tego promieniowania nie zależy od kierunku i nie można go przypisać żadnym dyskretnym obiektom astronomicznym. Takie same obserwacje można by wykonać, gdyby przyrządy pomiarowe umieścić w jakimś naczyniu o doskonale czarnych ścianach i temperaturze 3 K. Promieniowanie to wiąże się z wczesnymi fazami ewolucji Wszechświata i nazywa się reliktywym.

Obecny Wszechświat jest więc mieszaniną materii wchodzącej w skład różnych obiektów astronomicznych i równomiernie rozmieszczonej oraz promieniowania reliktywego. Z punktu widzenia fizyki można jego zawartość traktować jak wieloskładnikowy gaz. Siłą rzeczy gaz ten podlega w czasie ekspansji przemianie adiabatycznej — po prostu z braku „otoczenia”, z którym mógłby wymienić ciepło. Kiedyś musiał więc być gęstszy i gorętszy. Dla opisu ewolucji Wszechświata potrzebne są nam jakieś prawa dynamiki. Oddziaływaniem, które gra tu decydującą rolę, jest przyciąganie grawitacyjne. Spowalnia ono rozszerzanie się Wszechświata. W przeszłości, przy wysokich temperaturach i gęstościach, również ciśnienie odgrywało rolę w bilansie sił. I wystarczy uwzględnić te dwa czynniki, aby otrzymać wiarygodny obraz rozszerzania się Wszechświata. Równania ruchu powinny nam odpowiedzieć na pytanie, jak zmieniła się w czasie średnia gęstość i temperatura materii we Wszechświecie, dając jako przewidywane wartości obecnej gęstości, temperatury i tempa ekspansji wielkości obserwowane.

Rozwiązania tych równań mają jedną nieprzyjemną własność — wynika z nich, że ok. 10 mld lat temu gęstość materii i jej temperatura były nieskończone. Ponieważ nie znamy teorii grawitacji, która byłaby słuszna przy dowolnie dużych gęstościach (wtedy dałyby znać o sobie kwanty pola grawitacyjnego), nie możemy zinterpretować tego osobliwego stanu Wszechświata. Zaczniemy nasz opis „historii” Wszechświata nieco później, gdy temperatura przekracza nieco  $10^{12}$  K. Temperaturze tej odpowiadają energie cząstek rzędu GeV, przy których możliwe są reakcje powstawania par cząstek nieobojętnych na oddziaływania silne — hadronów. Od nich ta wczesna epoka ewolucji bierze swoją nazwę. Równocześnie każde „spotkanie” hadronu z jego antycząstką może prowadzić do ich anihilacji i utworzenia pary kwantów promieniowania elektromagnetycznego — fotonów. Jak wynika z rozważań teoretycznych opartych na bogatych danych eksperymentalnych fizyki cząstek elementarnych, reakcje kreacji i anihilacji zachodzą na tyle szybko, że ustala się równowaga termodynamiczna. W tej sytuacji stan materii określony już jest przez podanie jej temperatury i gęstości. To, ile jest hadronów każdego rodzaju, wynika z równowagi między reakcjami anihilacji i kreacji. Jak widzimy, znając fizykę wysokich energii, potrafimy bardzo prosto określić stan wczesnego Wszechświata — potrzeba na to bardzo niewiele informacji. Żadne złożone struktury nie istniały.



W czasie dmuchania punkty oddalają się od siebie zgodnie z prawem Hubble'a.



## Rozwiązanie zadania A1

Rozszerzanie się Wszechświata zgodnie z prawem Hubble'a nie świadczy o wyróżnionym położeniu naszej Galaktyki, ponieważ to samo prawo jest spełnione dla każdego innego punktu Wszechświata. Niech  $G_1$  i  $G_2$  oznaczają dwa dowolne, odległe punkty. Z naszej Galaktyki prowadzimy do tych punktów dwa wektory  $r_1$  i  $r_2$ . Prędkości oddalania się tych punktów są:

$$v_1 = H \cdot r_1 \quad \text{i} \quad v_2 = H \cdot r_2,$$

czyli prędkość  $v$  punktu  $G_2$  względem  $G_1$  jest proporcjonalna do odległości  $r$  między nimi:

$$v = v_2 - v_1 = H \cdot r_2 - H \cdot r_1 = H(r_2 - r_1) = H \cdot r.$$





Era hadronowa trwała ok.  $10^{-8}$  s. Po tym czasie anihilacja neutrona wzięta górę i większość hadronów zamieniła się na fotony. Pozostały najbardziej trwałe — neutrony i protony. W czasie następnej sekundy średnia energia cząstek była jeszcze na tyle duża, że możliwa była kreacja lekkich cząstek oddziaływujących słabo — leptonów. Zalicza się do nich elektrony, miony i bezmasowe neutrino w kilku rodzajach. W tej epoce również mamy do czynienia z równowagą termodynamiczną. Spadek temperatury poniżej  $10^{10}$  K spowodował anihilację mionów i par elektronowo-pozytonowych. Gwałtowny spadek gęstości leptonów łączy się ze zmniejszeniem prawdopodobieństwa oddziaływania neutrino z inną cząstką. Dlatego jeśli neutrino są cząstkami trwałymi (a tak obecnie sądzimy), to do dzisiaj otoczeni jesteśmy gazem neutrin, które od końca epoki leptonowej praktycznie nie oddziałują z innymi formami materii. W tej chwili temperatura neutrinowego gazu powinna wynosić ok. 3 K — nie znamy metody rejestracji neutrin o tak niskiej energii.

Aż do końca ery leptonowej neutrony i protony występują w równej ilości, ponieważ różnica ich mas, a co za tym idzie energii, jest niewielka w porównaniu ze średnią energią cząstek (proton i neutron to dwa stany tej samej cząstki — nukleonu). Potem reakcja rozpadu neutronu na proton, elektron i neutrino zaczyna mieć przewagę jako prowadząca do stanu o niższej energii. W ciągu 15 minut wszystkie neutrony powinny się były rozpaść. W tym czasie możliwe są jednak reakcje syntezy jądrowej — protony i neutrony mogą się łączyć w jądra deuteru, a te z kolei w jądra helu. Przy okazji powstają pewne ilości (b. małe) innych lekkich pierwiastków. Rachunki, które uwzględniają wszelkie możliwe reakcje termojądrowe prowadzą do wniosku, że około 1/4 masy zamieniona zostaje na hel. Obserwacje gwiazd potwierdzają wniosek, że materia, z której powstały, zawierała ok. 25% helu. Powstanie innych pierwiastków zawdzięczamy ewolucji gwiazd — głównie ich gwałtownemu, końcowemu stadium — wybuchom supernowych.

Jeszcze przez jakieś 100 tysięcy lat Wszechświat wypełniony był zjonizowanym gazem (plazmą) w równowadze termodynamicznej. Po tym czasie rekombinacja, czyli łączenie się elektronów i jąder w atomy spowodowało, że Wszechświat stał się przezroczysty dla promieniowania elektromagnetycznego. Od tego czasu promieniowanie i materia ewoluowały niezależnie. Promieniowanie to obserwujemy jako reliktove. Materia utraciła stan równowagi termodynamicznej. Druga zasada termodynamiki przestała mieć zastosowanie w odniesieniu do materii — możliwy stał się spadek entropii. Wyraził się on powstaniem we Wszechświecie struktur złożonych. Ich bogactwo możemy dzisiaj docenić.

**Rozwiązanie zadania A2**  
a) W ciągu jednego pełnego obiegu wokół Słońca Uran dokonuje  $n = a_U/d_U \approx 68089,70$  obrotów wokół własnej osi. Tyle dób gwiazdowych zawiera rok uranusowy. Jednak dób słonecznych jest o 1 więcej, gdyż Słońce — punkt odniesienia w liczeniu liczby obrotów — dokonuje w rocznym ruchu pozornym jednego obiegu wokół Urana (jest to odbicie obiegu planety wokół Słońca po przeniesieniu środka układu współrzędnych). Ponieważ  $\epsilon = 98^\circ > 90^\circ$ , więc Uran obiega Słońce obracając się ruchem wstecznym, a więc jeden obrót trzeba dodać (w przeciwieństwie do Ziemi, dla której  $\epsilon \approx 23^\circ 5'$  i gdzie dób słonecznych jest o 1 mniej niż gwiazdowych).



## Tajemnicze koincydencje we Wszechświecie



*Mgr Bronisław RUDAK*

Spróbujemy tu zająć się wielkościami opisującymi dwa krańcowo różne światy. Pierwszy — to świat atomów, w którym posługujemy się liczbami niewyobrażalnie małymi. Drugi — to Wszechświat.

Czy konfrontacja odpowiadających sobie parametrów z obu światów nie wyda się Wam czymś sztucznym? Nic dziwnego, co wspólnego może mieć długość klasycznego promienia elektronu z odległościami kosmicznymi mierzonymi milionami, a nawet miliardami lat świetlnych. A jednak przyjrzymy się temu bliżej. Do dalszych rozważań będzie nam potrzebna wielkość, o której, być może, nie każdy z Was słyszał. Obserwując odległe galaktyki znaleziono prostą zależność między prędkościami, z jakimi oddalają się one od nas ( $V_r$ ), a odległościami do nich ( $D$ ):

$$V_r(\text{km/s}) = H \cdot D(\text{Mpc}),$$

1 Mpc =  $10^6$  parseków  $\approx 3 \cdot 10^{19}$  km.

Współczynnik proporcjonalności  $H$ , tzw. stała Hubble'a, wynosi obecnie  $55 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$  (czyli  $1,46 \cdot 10^{-18}$  Hz).

Jej sens fizyczny można wyrazić tak: jeśli przyjąć, że wartość  $H$  nie zmienia się z czasem, to  $H^{-1}$  wyraża czas, jaki upłynął od momentu *Wielkiego Wybuchu* (kiedy rozpoczęła się ekspansja Wszechświata) do chwili obecnej.

Mając już skalę „wieku” Wszechświata możemy obliczyć jego „promień”:

$$R = c/H, \quad c \text{ — prędkość światła.}$$

Bardziej naturalną jednostką czasu niż sekunda jest jednostka związana ze światem atomów. Jest nią czas przejścia światła przez promień elektronu:

$$e^2/(m_e c^3) \approx 10^{-23} \text{ s}, \quad e \text{ — ładunek elementarny, } m_e \text{ — masa elektronu.}$$

Wiek Wszechświata wyrażony w tych jednostkach wynosi

$$t_0 = H_0^{-1} : \frac{e^2}{m_e c^3} \approx 7 \cdot 10^{39}$$

Uwaga: Indeks „0” oznacza obecną wartość parametrów. To wszystko, co będzie nam potrzebne.

Utwórzmy teraz kilka bezwymiarowych wielkości.

$$(a) \quad A_0 = \frac{e^2}{G \cdot m_p \cdot m_e} \approx 2 \cdot 10^{39},$$

$G$  — stała grawitacji,  $m_p$  — masa protonu.

$A_0$  wyraża stosunek wielkości siły elektrostatycznej do siły grawitacyjnej, działających między elektronem a protonem. Zobaczymy też, jaki jest stosunek obecnego promienia Wszechświata do klasycznego promienia elektronu:

$$(b) \quad B_0 \equiv R_0 : \frac{e^2}{m_e c^2} = \frac{c}{H_0} : \frac{e^2}{m_e c^2} \approx 10^{40}.$$

Widać, że z dokładnością do czynnika niewiele różnego od jedności

$$A_0 \approx t_0 \quad \text{oraz} \quad B_0 \approx t_0.$$