



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 przyjrzyjmy 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

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

Kolejny iloraz to $\frac{\text{masa całej materii Wszechświata}}{\text{masa protonu}} =$

= całkowita liczba nukleonów $\equiv N_0$.

Astrofizycy szacują tę liczbę na 10^{78} .

(c) $N_0 \approx 10^{78} \approx t_0^2$.

Inny przykład to stosunek klasycznego promienia elektronu do długości Plancka l_p :

(d) $C_0 \equiv \frac{\text{kl. prom. elektronu}}{l_p} \approx 10^{20} \approx t_0^{1/2}$

$l_p \equiv (hG/c^3)^{1/2} \approx 10^{-33}$ cm.

Podobnych związków można znaleźć więcej.

Może to tylko przypadek, że udało nam się pewne bezwymiarowe wielkości prosto związać z t_0 , ale ciekawe byłoby założyć, że takie relacje są faktem i zbadać ich konsekwencje.

Tak właśnie zrobił wielki fizyk Paul Dirac. Zaproponował on następującą hipotezę:

HIPOTEZA WIELKICH LICZB

Wielkie bezwymiarowe liczby są proporcjonalne do czasu kosmicznego w pewnych prostych potęgach.

Zgodnie z tą hipotezą związki (a), (b), (c) i (d) są słuszne dla dowolnej chwili czasu kosmicznego t .

$$\begin{array}{ll} \text{(a')} & A = t \\ \text{(b')} & B = t \\ \text{(c')} & N = t^2 \\ \text{(d')} & C = t^{1/2} \end{array}$$

Dirac uczynił jeszcze jedno założenie. Przyjął, że stałe atomowe są istotnie stałe.

Popatrzmy teraz na związek (c'). Ponieważ wartość t rośnie, musi też rosnąć ilość nukleonów. Doszliśmy zatem do warunku ciągłej kreacji materii we Wszechświecie. Względny przyrost masy M dowolnego obiektu (np. pomieszczenia redakcyjnego Delta) w czasie Δt wynosiłby

$$\left(\frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta M}{M} \right)_0 = \frac{2}{t_0} = 2 \cdot 10^{-10} / \text{rok}.$$

Niestety, jest to liczba zbyt mała, aby można było sprawdzić ją doświadczalnie.

Konsekwencją formuły (a') lub (d') jest zmiana stałej grawitacyjnej w czasie:

$$G \sim t^{-1}.$$

Zgodnie z tą formułą względna zmiana G w czasie Δt powinna wynosić

$$-\left(\frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta G}{G} \right)_0 = \frac{1}{t_0} \approx 8,3 \cdot 10^{-11} / \text{rok}.$$

Zaczęto naturalnie szukać obserwacyjnego potwierdzenia tych zmian. Stwierdzona została względna zmiana G na poziomie $9(\pm 4) \cdot 10^{-11} / \text{rok}$. Jednak nie wszyscy są przekonani o dokładności przeprowadzonych pomiarów.

Należy podkreślić, że ewentualne zmiany stałej grawitacji G mają bardzo istotne konsekwencje astronomiczne i kosmologiczne. Przykładem niech będzie wpływ tych zmian na ewolucję gwiazdy (np. naszego Słońca). Całkowita ilość energii wypromieniowywanej przez gwiazdę w jednostce czasu silnie zależy od G ($\sim G^8$). Jeśli rzeczywiście w poprzednich epokach G było większe, to i ilość wypromieniowanej energii była większa niż obecnie. Reakcje termojądrowe we wnętrzu gwiazdy zachodziły szybciej, a tym samym szybsza była ewolucja gwiazdy. Obliczono, że w takiej sytuacji Słońce wyglądałoby w tej chwili zupełnie inaczej — byłoby tzw. czerwonym olbrzymem. A przecież tak nie jest. Przypomnijmy jeszcze jedną rzecz o kapitalnym znaczeniu. Teoria Einsteina wymaga istotnej stałości stałej grawitacji. Jak z tymi trudnościami poradził sobie Dirac, oraz o niektórych wnioskach z jego hipotezy napiszemy innym razem.

Masery kosmiczne



Dr Tomasz KWAST

Powszechnie przyjętą w fizyce metodą badawczą jest poznanie zjawisk czy obiektów fizycznych przez badanie własności ich modeli. Takimi modelami są np. ciecz nielepką, gaz doskonały, soczewka cienka, wahadło matematyczne i wiele innych. Jest nim również tzw. równowaga termodynamiczna (RT). Jest to model pewnego specyficznego stanu materii, mianowicie takiego, w którym dokładnie równoważą się wszelkie procesy zachodzące w tej materii. Jeżeli np. jakiś gaz znajduje się w RT, to znaczy, że w każdej chwili tyle samo cząstek porusza się w prawo co i w lewo, w jednostce czasu następuje tyle samo wzbudzeń atomów co i przejść na niższe poziomy energetyczne, tyle samo jonizacji co rekombinacji itd. Również promieniowanie przenikające ten gaz w stanie RT ma specjalny rozkład widmowy i w jednostce czasu zachodzi tyle samo pochłonięć fotonów co ich emisji. Dokładniej, stan RT charakteryzuje się tym, że prędkości cząstek podlegają rozkładowi Maxwella, obsadzenia poziomów energetycznych rozkładowi Boltzmanna, stan jonizacji równaniu Sahy, a rozkład widmowy promieniowania prawu Plancka, przy czym wszystkie te rozkłady obowiązują dla tej samej temperatury.

RT, jak każdy model, jest w przyrodzie realizowana jedynie w lepszym lub gorszym przybliżeniu. Np. w dzień w każdym pokoju prędkości cząstek w powietrzu odpowiadają temperaturze pokojowej, zaś rozkład widmowy promieniowania przenikającego pokój odpowiada temperaturze powierzchni Słońca. Mówimy, że temperatura kinetyczna nie jest równa temperaturze jasnościowej, a to już dowodzi braku RT.

Stan bliski RT panuje natomiast w ciemni fotograficznej przy wygaszonych wszystkich światłach lub w samym centrum gwiazdy.

Rozpatrzmy, co dzieje się z promieniowaniem o natężeniu I przechodzącym przez jakiś ośrodek. Przyjmijmy dla uproszczenia, że atomy ośrodka mają tylko dwa stany energetyczne. Gęstość atomów w stanie niższym o energii E_1 oznaczmy przez N_1 , zaś znajdujących się w stanie wyższym o energii E_2 przez N_2 . Naturalnie, część promieniowania zostanie pochłonięta przez niektóre z atomów znajdujących się akurat w stanie niższym, z kolei niektóre atomy znajdujące się w stanie wyższym wyświecą nieco tego promieniowania. Zjawisk to wygodnie jest opisać przy pomocy tzw. współczynników Einsteina A_{21} , B_{21} i B_{12} , które oblicza się metodami mechaniki kwantowej, a które są tak określone, że $N_1 B_{12} I$ jest liczbą atomów w jednostce objętości, które w jednostce czasu przechodzą na poziom wyższy (a więc pochłaniają część promieniowania), $N_2 A_{21}$ jest analogiczną liczbą atomów, które spontanicznie przechodzą z poziomu wyższego na niższy, wreszcie $N_2 B_{21} I$ liczbą atomów, które również dokonują przejścia „w dół”, ale przejścia wymuszonego pod wpływem promieniowania przenikającego ośrodek. W stanie RT oczywiście liczba przejść w dół musi być równa liczbie przejść w górę. Inaczej można też powiedzieć, że ilość energii wyświeconej musi być równa ilości energii pochłoniętej. Zatem skoro przy każdym przejściu jest pochłaniany lub wyświecany kwant o energii $E_2 - E_1 = h\nu$, to

$$N_2 A_{21} h\nu + N_2 B_{21} I h\nu = N_1 B_{12} I h\nu.$$