

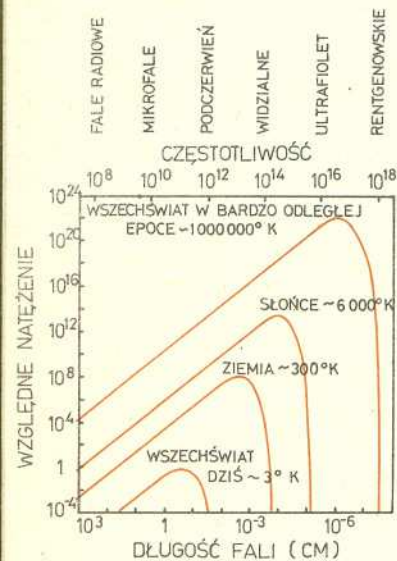
Dr Bronisław KUCHOWICZ

NAJSTARSZE SKAMIELINY KOSMOSU

Zajmijmy się na wstępie pewną konsekwencją odkrycia Hubble'a, o którym wspominaliśmy w 8 numerze „Delt” z 1976 roku. Sięgając przy użyciu coraz to doskonalszych teleskopów w obszary coraz dalsze, cofamy się zarazem w czasie, ku epokom coraz wcześniejszym. Obserwacje wskazują na to, że rozszerzanie się Wszechświata wciąż trwa, odległości między galaktykami stale wzrastają. A jeśli cofać się wstecz w czasie, to odległości te będą coraz mniejsze. Kiedyś wreszcie, dawno temu (brzmi to jak w bajce) nie istniały oddzielne ciała niebieskie. Po prostu odległości między galaktykami, jak również i między poszczególnymi ciałami niebieskimi w tych galaktykach, równe były zeru. Co więcej, jeśli cofać się w czasie dostatecznie daleko, wtedy przestaną istnieć atomy i jądra atomowe. Ulegną one pogruchotaniu w warunkach ogromnego ciśnienia, materia w tych warunkach stanowi jak gdyby gorący gaz utworzony z cząstek elementarnych, przede wszystkim z protonów, neutronów, elektronów. Stan ten nazywamy stanem nadgęstym; materia w tym stanie to materia we wnętrzach jąder atomowych. Gęstość jej jest wielkością rzędu $10^{15} - 10^{14}$ g/cm³. Miliard ton w centymetrze sześciennym.

Trudno nam dziś na podstawie znanych praw fizyki wyobrazić sobie materię bardziej zagęszczoną niż wspomniana wyżej materia jądrowa. Z gęstością taką spotykamy się we wnętrzach niedawno odkrytych małych i masywnych ciał niebieskich — pulsarów, zwanych niekiedy gwiazdami neutronowymi, jako że podstawowym składnikiem materii jądrowej w ich wnętrzach mają być neutrony. (O pulsarach pisaliśmy w numerze 11 Delt z 1974 r.). Nie cofajmy się więc w rozważaniach nad stanem materii we Wszechświecie poza ową fazę materii nadgęstej. Sądzić można, że w równowadze dynamicznej z owym gazem cząstek elementarnych istniały różne rodzaje promieniowania: promieniowanie elektromagnetyczne wszystkich długości fal, promieniowanie neutrinowe, a może jeszcze jakieś inne, dziś nam nieznanne. Ograniczmy się w rozważaniach tylko do promieniowania elektromagnetycznego. Kwanty tego promieniowania to ulegają absorpcji przez cząstki, to znów są emitowane. W warunkach określonej gęstości materii ustala się równowaga dynamiczna pomiędzy promieniowaniem elektromagnetycznym a resztą materii; gęstość energii promieniowania stanowi dobrze określoną część całkowitej gęstości energii, jednocześnie promieniowanie to charakteryzuje się rozkładem widmowym energii bliskim rozkładowi promieniowania ciała doskonale czarnego. Początkowo w fazie nadgęstej rozkład ów odpowiada wysokiej temperaturze Wszechświata, rzędu miliardów czy milionów stopni. Krzywa rozkładu widmowego wyglądać będzie jak najwyższa krzywa na rysunku obok. W miarę rozszerzania się Wszechświata temperatura jego będzie spadać. Maksimum rozkładu przesunąć się będzie wtedy w lewo, w stronę fal coraz dłuższych. W fazie nadgęstej promieniowania elektromagnetycznego we Wszechświecie stanowiły przede wszystkim kwanty gamma. Wraz ze stygnięciem Wszechświata i jego rozszerzaniem przesunięcia dopplerowskiego doznawało wszelkie promieniowanie elektromagnetyczne, nie tylko to, które emitują galaktyki. To promieniowanie, które kiedyś istniało we Wszechświecie nadgęstym jako wysokoenergetyczne promieniowanie w zakresie X i γ , przeszło już dziś w zakres bardziej długofalowy, być może do obszaru radiowego. Pod względem energetycznym jest więc ono dziś zaledwie szczątkiem dawnego promieniowania wysokiej energii, zasługuje zatem na nazwę promieniowania szczątkowego. Jednocześnie musi ono trwać nadal we Wszechświecie, przenikając wszelkie jego obszary, będąc uniwersalnym tłem zdarzeń we Wszechświecie. Stąd też nazwa *promieniowanie tła*, nadawana promieniowaniu szczątkowemu. Na rysunku powyżej przedstawiliśmy w celach porównawczych kilka rozkładów promieniowania ciał o różnej temperaturze. Jaka jest obecna temperatura Wszechświata, jeśli można uważać go za ciało czarne? Poszukajmy promieniowania tła, a dokładne wyznaczenie jego maksimum natężenia przy pewnej długości fali pozwoli nam na podstawie rodziny rozkładów (jak na rysunku) wniesić, jaka jest temperatura Wszechświata dziś.

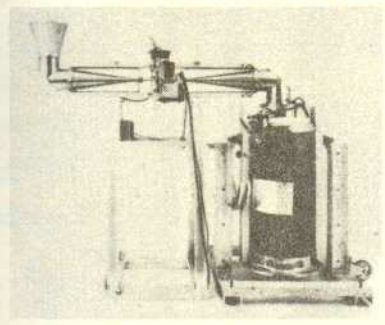
Tak mniej więcej wyglądało rozumowanie, jakie przed trzydziestu laty przeprowadził wybitny fizyk i kosmolog amerykański pochodzenia rosyjskiego, George Gamow (1904–1968). Przewidział on nawet (ze swymi współpracownikami) prawie poprawną wartość temperatury Wszechświata w epoce dzisiejszej, bo około 5 K (tzn. 268 stopni Celsjusza poniżej zera). Tak gorący czy raczej chłodny miał być obecnie Wszechświat. Do połowy lat sześćdziesiątych niemal powszechnie zapomniano (albo raczej: nie zwrócono uwagi) o tym przewidywaniu. Fizyk amerykański z Princeton, R. H. Dicke, raz jeszcze „odkrył” na papierze możliwość występowania promieniowania tła i zapragnął wykryć je w rzeczywistości. Grupa fizyków z Princeton zaczęła przygotowywać się do systematycznego poszukiwania promieniowania tła. W połowie lat sześćdziesiątych prace ich nad budową odpowiedniej aparatury (ukazanej na jednym ze zdjęć) były już na ukończeniu. Sława i radość odkrycia przypadły jednak komu innemu. A oto jak do tego doszło.



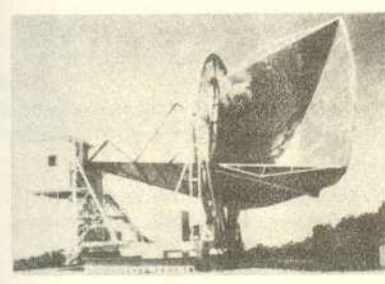
Rozkład energii w widmie ciała czarnego przy różnych temperaturach

Georgi Antonowicz Gamow, znany później jako George Gamow (1904–1968), urodzony w Odessie, uczęszczał na uniwersytet w Leningradzie, po obronie dysertacji przebywał w Getyndze, Cambridge i Kopenhadze. W 1928 roku na podstawie mechaniki kwantowej opracował teorię zjawiska tunelowego. W 1931 roku został członkiem — korespondentem Akademii Nauk ZSRR w wieku zaledwie dwudziestu siedmiu lat. Od roku 1934 przebywał w Stanach Zjednoczonych, gdzie pracował nad przemianą beta, reakcjami jądrowymi w gwiazdach, kosmologią, a nawet nad bronią atomową i wodorową. Począwszy od 1954 roku zaczął zajmować się problematyką biologii, wysuwając koncepcję kodu genetycznego. Laureatem nagrody Nobla nie był, choć, jak po jego zgonie pisano, gdyby nagrodę tę otrzymał, nikt by się temu nie dziwił. Wkład jego do nauki upoważniał do takiego przypuszczenia.

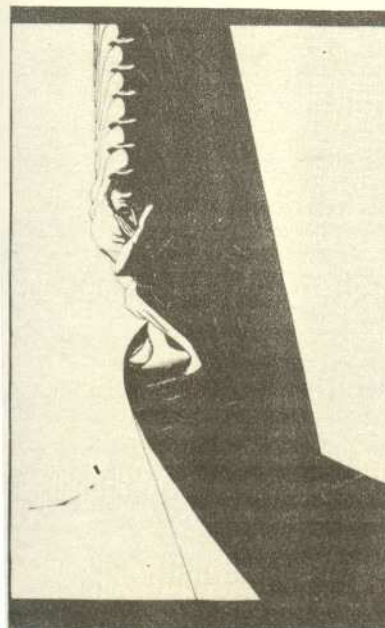
Gamow był znakomitym popularyzatorem nauki, w 1956 roku otrzymał nawet specjalną nagrodę międzynarodową ONZ za popularyzację. Polecamy dwie jego książki, które ukazały się w polskim tłumaczeniu: *Mister Tompkins w krainie czarów* (1962) oraz *Materia, ziemia i niebo* (1963).



Radiometr grupy z Princeton — służący do rejestracji promieniowania tła. Widok z boku i z góry



Antena grupy z Bell Telephone Laboratories, przy użyciu której wykryto promieniowanie tła.

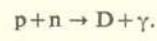


Nie opodal Princeton, w Bell Telephone Laboratories w Holmdel, Arno A. Penzias i Robert W. Wilson zajmowali się konstrukcją anteny do odbioru słabych sygnałów radiowych w zakresie fal o długości centymetrowej. Zbudowana przez nich antena w kształcie rogu (patrz zdjęcie obok) przeznaczona być miała do odbioru sygnałów odbitych przez sztuczne satelity z serii Echo. Nastawiona była ona na długość fali 7,35 cm. Jesienią 1964 roku męczyli się oni nad usunięciem szumu w ich aparaturze. Próby wykrycia źródeł tego szumu nie dały żadnych rezultatów, trzeba było przyjąć, iż dociera on do aparatury równomiernie ze wszystkich kierunków. Innymi słowy, promieniowaniem tym wypełniony jest izotropowo Wszechświat. Tak oto Penzias i Wilson dokonali niezamierzonego odkrycia promieniowania tła, którego poszukiwała grupa z Princeton. Wkrótce potem wykonano pomiary w Princeton na długości fali 3,2 cm, później w różnych miejscach na długościach fal od milimetrów do kilkudziesięciu centymetrów. Wszystkie te pomiary przyniosły zgodną odpowiedź: całe niebo świeci równomiernie, temperatura odbieranego promieniowania wynosi ok. 2,8 K. Gdy już odkryto promieniowanie tła, astronomowie przypomnieli sobie stare wyniki obserwacji linii absorpcyjnych rodnika cyjanowego CN w ośrodku międzygwiazdowym. Wydawało się wtedy, jakby cząsteczki CN znajdowały się w stanie wzbudzonym przez nieznanne bliżej promieniowanie radiowe o temperaturze powyżej 2 K. Wyjaśnienie tego faktu i analogicznych wzbudzeń rodnika CN oraz jonu CH⁺, których linie absorpcyjne obserwowano, okazało się obecnie naturalne.

Do chwili obecnej nie udało się stwierdzić jakiegokolwiek mierzalnej anizotropii promieniowania tła. Gęstość energii związana z tym promieniowaniem jest rzędu $6 \cdot 10^{-14} \text{ J/m}^3$ ($6 \cdot 10^{-13} \text{ erg/cm}^3$), wynosi więc niemal tyle co łączna średnia gęstość energii promieniowania gwiazd w Galaktyce. A dodajmy tu, że gęstość energii promieniowania tła jest praktycznie taka sama i w Galaktyce i poza nią.

Promieniowanie tła uważać można za najstarszą skamielinę Wszechświata, za coś, co w zniekształconej wprawdzie postaci, dotrwało jednak do chwili obecnej, i świadczy o tym, jak wspaniały, gorący był kiedyś Wszechświat. „Co nam zostało z tych lat” (gdy tak gorący był świat). Związek pomiędzy spadkiem temperatury Wszechświata a jego ekspansją można sobie naiwnie wyjaśnić, odwołując się do pojęcia przemiany adiabatycznej gazu, bez wymiany energii z otoczeniem. Nieustanne rozszerzanie się Wszechświata stanowi jak gdyby (mówimy „jak gdyby”, bo nie ma pewności, czy pojęcie przemiany adiabatycznej, słuszne dla układów izolowanych od czegoś, wolno stosować do całego Wszechświata, poza którym niczego już nie ma) ekspansję adiabatyczną. Zawarty we Wszechświecie gaz cząstek (promieniowanie też) musi wykonywać pracę, temperatura więc będzie spadać. Przeżycie wymaga wysiłku, istniejące nadal fotony starzeją się, zwiększając swą długość fali.

Obok promieniowania szczątkowego Wszechświat zawiera jeszcze inne skamieliny z pierwszych faz swej ewolucji. Rozważmy tylko krótko wyniki obserwacji składu chemicznego materii we Wszechświecie. Wodór stanowi ok. 90% ogólnej liczby atomów, helu jest o rząd mniej, a cała reszta pierwiastków stanowi poniżej jednego procenta tej liczby. Pierwiastki, jak o tym dziś już dobrze wiemy, tworzą się przede wszystkim w przemianach jądrowych we wnętrzach gwiazd. Wystarczy wspomnieć o „spalaniu” wodoru na hel we wnętrzu Słońca. A czy procesy tworzenia się pierwiastków chemicznych nie mogły odbywać się jeszcze przed powstaniem gwiazd, po prostu wtedy, gdy w gorącym Wszechświecie był tylko gaz cząstek elementarnych, z którego zaczynały się tworzyć atomy? Na pewno z materii jądrowej (n, p, a także e) przy dostatecznie silnym jej rozrzedzeniu tworzyły się najpierw jądra, a następnie i atomy wodoru: przecież proton ze związanym na orbicie elektronem to atom wodoru. A neutrony w stanie swobodnym nie mogłyby przetrwać, wszak rozpadają się one dając proton, elektron i antyneutrino. Część tych neutronów — przed swym rozpadem zdążyłaby jeszcze zostać wychwycona przez protony, przy czym tworzyłyby się ciężki izotop wodoru, deuter:



Jak z powyższego widać, wodór jest tym pierwiastkiem chemicznym, który przy ekspansji Wszechświata ze stanu pierwotnego bardzo dużej gęstości musiał w sposób nieunikniony powstać. A skład izotopowy wodoru (tj. stosunek ilościowy rozpowszechnienia obu izotopów wodoru ¹H: ²D) zawiera odpowiednio zakodowany (i do dziś jeszcze w pełni nie rozszyfrowany!) zapis historii Wszechświata z pierwszych faz jego rozwoju.

Analogiczny zapis historyczny zawiera się w kosmicznym rozpowszechnieniu następnego po wodorze pierwiastka — helu. Z analizy częstości występowania helu w różnych rodzajach gwiazd, nawet tych najstarszych, okazało się, że nie można całej ilości helu w przyrodzie przypisać tylko procesom spalania wodoru w gwiazdach. Właściwie to jest tak, że większa część helu powstała wraz z wodorem w początkowych fazach ekspansji Wszechświata (np. w kolejnych reakcjach: $D + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$, $D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$, lub $D + D \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$), i od razu wraz z wodorem weszła w skład najstarszych gwiazd. Tak więc i wodór, i większa część helu w przyrodzie stanowią innego rodzaju skamieliny z początkowych faz rozwoju Wszechświata.



Rozwiązanie zadania M 101.

Z nierówności trójkąta mamy

$$AP \leq AD + DP,$$

$$AD = BC \leq BP + PC,$$

skąd $AP \leq BP + PC + DP$, przy czym równość (*)

$$AP = BP + PC + DP$$

zachodzi tylko wtedy, gdy $AP = AD + DP$,

$BC = BP + PC$. Ostatnie dwie równości

zachodzą tylko wtedy, gdy punkt P leży na

prostej AD i BC , co jest niemożliwe, gdyż

proste te są równoległe i różne. Równość (*)

nie może więc zachodzić, mamy więc

$$AP < BP + PC + DP.$$

Podaliśmy dotąd tylko fakty — fakty natury kosmologicznej. Każdy rozsądny model Wszechświata powinien fakty te tłumaczyć. Nierzaz wybiegaliśmy wyjaśnieniami do przodu, zasadnicze jednak wyobrażenia o rozwoju Wszechświata będą przedstawione w dalszych numerach Delt. Wyobrażenia te wiążemy z geometrycznym opisem ekspansji w ramach modeli kosmologicznych opartych na ogólnej teorii względności. Przez dwa lub trzy następne numery Delt rozważania nasze pobiegą nurtem kosmologii geometrycznej, przedstawiającej, jak geometria Wszechświata zmienia się z upływem czasu, jak możliwa jest ekspansja przestrzenna. Dopiero później powrócimy do obrazu procesów fizycznych, przebiegających w rozszerzającym się Wszechświecie.

Wspomnieć jeszcze można o takich faktach, jak np. o hierarchii struktur materialnych we Wszechświecie. Mamy więc gwiazdy (często w układach podwójnych i wielokrotnych, lub z układami planetarnymi), gromady gwiazd, galaktyki, gromady galaktyk. Niekiedy przypuszcza się, że istnieją jeszcze gromady gromad, brak na to jednak wystarczającego poparcia obserwacyjnego. Znany obiekt o niezwykłych właściwościach — kwazary, o których charakterze fizycznym niezwykle mało wiemy. Jeśli przesunięcia linii widmowych w kwazarach wiązać z ekspansją Wszechświata, wtedy kwazary są obiektami najstarszymi i najbardziej oddalonymi od nas. Na podstawie zliczeń gwiazd i galaktyk ocenia się wreszcie średnią gęstość materii we Wszechświecie. Przy założeniu, iż podstawowa masa materii, dostępna obserwacjom, skupiona jest w galaktykach, średnia gęstość masy we Wszechświecie jest rzędu 10^{-28} kg/m^3 (10^{-31} g/cm^3). Oszacowanie to mogłoby się w sposób istotny zmienić, gdyby istotny wkład do masy Wszechświata wносиły takie obiekty, o których obecności w przestrzeni na podstawie ich świecenia z przyczyn zasadniczych nic się wnieść nie da, a więc np. czarne karły, wystygłe gwiazdy neutronowe, czarne jamy. O obiektach tych na razie mówić nie będziemy. Chętni do zapoznania się z tym egzotycznym „zwierzyńcem” przestrzeni kosmicznej sięgnąć mogą do książki popularnej Parnowa „Na skrzyżowaniu nieskończoności” (PWN 1971).



Rozwiązanie zadania F 34.

Zastanówmy się najpierw jak praktycznie można by podgrzewać jedno z ciał. Najprostszą intuicyjnie metodą podgrzania np. ciała A , byłoby skonstruowanie silnika cieplnego, w którym ciało B odgrywałoby rolę źródła ciepła natomiast ciało C — chłodnicy. Praca otrzymana w ten sposób mogłaby zostać zużytkowana na podgrzanie ciała A . Oczywiście będziemy rozważać silniki cieplne z odwracalnym przebiegiem cyklu, bowiem sprawność takich silników jest największa. W dyskutowanej metodzie sprawność ta zmieniałaby się z czasem i wynosiła w danym momencie:

$$\eta = \frac{T_B - T_C}{T_B},$$

a ilość ciepła pobrana przez ciało A przy zmianie temperatury źródła B o $-dT_B$ równa się:

$$\Delta Q_A = -\eta \Delta Q_B, \text{ czyli } dT_A = -\frac{T_B - T_C}{T_B} dT_B.$$

Ponieważ dla cyklu zachodzi nierówność Clausiusa

$$(1) \quad \frac{\Delta Q_B}{T_B} + \frac{\Delta Q_C}{T_C} \leq 0 \quad (\text{równość dla cyklu odwracalnego})$$

to otrzymujemy:

$$(2) \quad \frac{dT_B}{T_B} + \frac{dT_C}{T_C} \leq 0,$$

skąd wynika (procesy odwracalne)

$$(3) \quad T_B \cdot T_C = C_1 = \text{const.}$$

Proces ogrzewania zakończy się, gdy temperatury ciał B i C wyrównają się ($T_B = T_C$).

Ponadto z zachowania całkowitej energii (układ 3 ciał jest izolowany od otoczenia) oraz stałości ciepła właściwego ciał wynika, że:

$$(4) \quad T_A + T_B + T_C = C_2 = \text{const.}$$

W oparciu o równania (3) i (4) natychmiast otrzymujemy, że przy zaproponowanej metodzie maksymalna osiągalna temperatura ciała A wynosi $(700 - \sqrt{3} \cdot 200) \text{ K} \approx 355 \text{ K}$.

Jednak omówiona metoda nie jest optymalna, gdyż praca otrzymana z tak skonstruowanego silnika cieplnego jest zamieniana na ciepło dla ciała A w sposób nieodwracalny. Skonstruowany silnik cieplny musi jednocześnie pracować z wszystkimi trzema ciałami. Wówczas warunek (1) przybiera postać (patrz podręcznik S. Szczeniowskiego)

$$(5) \quad \frac{\Delta Q_A}{T_A} + \frac{\Delta Q_B}{T_B} + \frac{\Delta Q_C}{T_C} \leq 0,$$

czyli ze względu na równe ciepło właściwe rozważanych ciał:

$$(6) \quad \frac{dT_A}{T_A} + \frac{dT_B}{T_B} + \frac{dT_C}{T_C} \leq 0.$$

Z równania (6) wynika związek (dla procesów odwracalnych)

$$(7) \quad T_A \cdot T_B \cdot T_C = C_3 = \text{const.}$$

Równocześnie nadal obowiązuje zależność (4). Jedno z ciał osiągnie maksymalną temperaturę, gdy temperatury pozostałych wyrównają się (np. $T_B = T_C$ — inaczej można by było nadal kontynuować proces grzania). Warunki (4), (7) i $T_B = T_C$ prowadzą do równania trzeciego stopnia względem T_A :

$$2T_A^3 - C_2 \cdot T_A^2 - C_3 = 0,$$

którego tylko jedno rozwiązanie odpowiada fizycznym warunkom zadania. Okazuje się, że maksymalna temperatura, do której można podgrzać jedno z ciał, wynosi 400K.

Wyrażenie $\frac{\Delta Q}{T}$ w granicy, gdy $\Delta Q \rightarrow 0$, jest różniczką zupełną wielkości fizycznej zwanej entropią $\left(dS = \frac{dQ}{T} \right)$. Entropia jest wielkością addytywną i w izolowanych procesach odwracalnych całkowita entropia układu ciał pozostaje stała.

