

O pochodzeniu pierwiastków

Monika SZYMKOWIAK

Z czego składa się Wszechświat? Jakie pierwiastki chemiczne są w nim zawarte i w jakich proporcjach? To pytanie bardziej dociekliwa część ludzkości zapewne zadawała sobie od dawna, jednak musiało ono pozostać bez odpowiedzi aż do początku naszego stulecia, kiedy to rozwój astrofizyki i podstawowego jej narzędzia – spektroskopii – pozwolił na coraz dokładniejsze badanie składu chemicznego odległych ciał niebieskich.

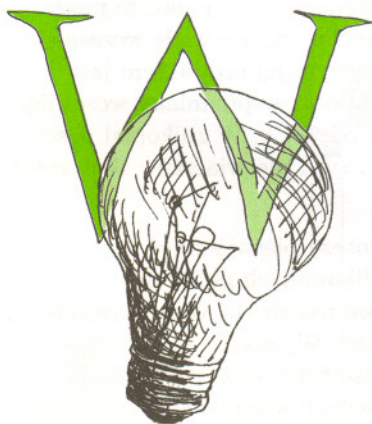
Pierwszym pozaziemskim obiektem, którego skład zbadano, było, oczywiście, Słońce. Okazało się, że składa się ono z grubsza w jednej czwartej z helu, a reszta to wodór. Później naukowcy skierowali swą ciekawość ku innym gwiazdom i materii międzygwiazdowej. Wyniki obserwacji wskazywały jednoznacznie, że wszystkie te obiekty mają zbliżony skład chemiczny!

Pod koniec lat trzydziestych opracowano już pierwsze tabele przedstawiające rozpowszechnienie pierwiastków we Wszechświecie. Gdy tego dokonano, przed naukowcami pojawiło się nowe wyzwanie: teoretyczne wyjaśnienie takiego właśnie stanu rzeczy.

Pierwszym, który się o to pokusił, był G. Lemaître. Wysunął on hipotezę, że Wszechświat zaczął się od stanu, w którym całkowita jego energia skoncentrowana była w przestrzeni o promieniu kilku minut świetlnych. Ten stan Lemaître wyobrażał sobie jako jądro gigantycznego Pierwotnego Atomu. Atom taki byłby niestabilny radioaktywnie i rozpadałby się na fragmenty, które, również niestabilne, rozpadałyby się dalej i ulatywały w przestrzeń kosmiczną. Podział ten zatrzymuje się na pierwiastkach trwałych lub na pierwiastkach o długim czasie życia.

Hipoteza ta była bardzo ogólnikowa i trudno było mówić o jakiegokolwiek jej weryfikacji. Dopiero po jej uściśleniu przez M. Meyera i E. Tellera można było dokonać jej konfrontacji z ówczesnymi obserwacjami. Wówczas zwolenników tej teorii spotkało rozczarowanie. Okazało się, że nie potrafi ona wyjaśnić, skąd wzięły się lekkie pierwiastki. A przecież to z nich właśnie zbudowany jest Wszechświat w ponad 99%!

Kilkanaście lat później w kosmologii zyskał popularność model rozszerzającego się Wszechświata, zaproponowany przez Friedmana, a rozwój fizyki jądrowej istotnie zmienił stan wiedzy o procesach, które mogą zachodzić w warunkach wysokiej gęstości, ciśnienia i temperatury, jakie musiały panować w pierwszych chwilach po Wielkim Wybuchu. Znając dobrze te dwie gałęzie fizyki, G. Gamow opracował zupełnie inną od poprzednich teorię powstawania pierwiastków we Wszechświecie. Wiedział on, że w modelu Friedmana gęstość promieniowania zmienia się jak czwarta potęga temperatury, natomiast gęstość materii – jak jej trzecia potęga. Ponieważ temperatura rośnie w miarę cofania się w stronę Wielkiego Wybuchu, to odpowiednio wcześniej gęstość promieniowania musiała przewyższać gęstość materii. Stąd prosty wniosek: we wczesnych etapach ewolucji Wszechświat zdominowany był przez promieniowanie! Gamow wyobrażał sobie wczesne stany materii jako bardzo ściśnięty gaz neutronowy zanurzony w kąpeli promieniowania elektromagnetycznego o bardzo wysokiej temperaturze. Gaz ten zaczął się rozpadać na protony i elektrony, gdy ciśnienie jego spadło w następstwie ekspansji Wszechświata. Wychwytywanie ciągle jeszcze obecnych neutronów przez nowo utworzone protony doprowadziło do powstania jąder deuteru, a następne wychwytywanie neutronów do utworzenia cięższych jąder. Wkrótce współpracę z Gamowem podjęli R. Alpher i H. Bethe (stąd opracowaną przez nich hipotezę do dziś nazywa się α - β - γ). Starali się oni wyznaczyć kształt krzywej obfitości pierwiastków we Wszechświecie i porównać ją z krzywą sporządzoną na podstawie dostępnych wówczas obserwacji. Okazało się, że o ile dla lekkich pierwiastków krzywe niemal się pokrywają, o tyle produkcji cięższych teoria nie potrafiła dobrze wyjaśnić. Wkrótce też zaczęto zwracać uwagę na inne jej mankamenty. C. Hayashi zauważył, że w odpowiednio



wysokiej temperaturze (to jest około 10^{10} K) Wszechświat powinien być wypełniony nie neutronami, lecz mieszaniną protonów i neutronów, a także elektronami, pozytonami, neutrinami i antyneutrinami. Przemiana neutronów w protony i odwrotnie zachodzić musiała dzięki reakcjom z udziałem słabych oddziaływań. Dzięki nim początkowe obfitości protonów i neutronów były niemal równe.

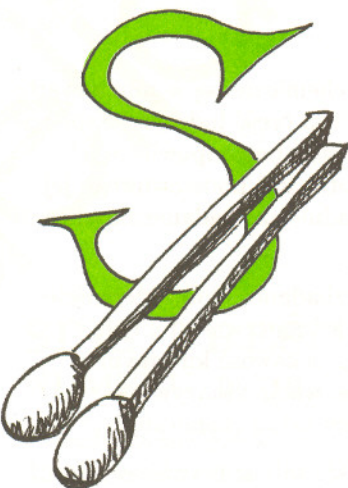
Teoria α - β - γ napotkała też inne trudności. Okazuje się, że w przyrodzie nie występują trwałe jądra atomowe o liczbach masowych 5 i 8, przez które powinien przebiegać łańcuch kolejnych przemian. Poza tym ${}^4\text{He}$ jest jądrem o dużej energii wiązania. Oznacza to, że w praktyce mechanizmy α - β - γ mogą wyprodukować tylko znikome ilości cięższych pierwiastków. Przeciwnicy tej teorii twierdzili złośliwie, że wyjaśnia ona powstanie wszystkich pierwiastków tablicy Mendelejewa aż do helu włącznie. Mimo to hipoteza ta nadal cieszyła się popularnością. Przede wszystkim dlatego, że nie było lepszej. Poza tym dobrze pasowała do modelu Friedmana rozszerzającego się świata. Spodziewano się, że rozwój fizyki jądrowej przyczyni się do wyjaśnienia syntezy cięższych pierwiastków.

Tymczasem rozwój kosmologii poszedł nagle w nieoczekiwanym kierunku. H. Bondi i T. Gold opracowali model Wszechświata stanu stacjonarnego. W modelu tym przez cały czas następuje kreacja materii tak, by pomimo jego rozszerzania się zachował on stałą gęstość. Taki Wszechświat nie był nigdy gęsty i gorący, nie było więc w nim miejsca na procesy α - β - γ . Wtedy to E.M. Burbidge, G.R. Burbidge, A. Fowler i F. Hoyle zaproponowali konkurencyjną teorię nukleosyntezy (nazywamy ją w skrócie BBFH). Mówi ona, że izotopy pierwiastków chemicznych powstają z wodoru drogą przemian jądrowych we wnętrzach gwiazd oraz podczas wybuchów supernowych. Podczas tychże wybuchów jądra powstałych cięższych pierwiastków chemicznych wzbogacają przestrzeń kosmiczną, tak że kolejne pokolenia gwiazd i galaktyk już od początku zawierają ciężkie pierwiastki. W ten oto sposób dokonuje się chemiczna ewolucja Wszechświata.

Teoria BBFH szybko odniosła sukces. Stała się mocnym argumentem dla zwolenników kosmologii stanu stacjonarnego. Jednak po początkowym okresie zafascynowania zauważono poważne jej mankamenty. Przede wszystkim porównano przewidywania z obserwacjami. Według oszacowań BBFH rozpowszechnienie helu wynosi 1–4%, podczas gdy obserwacje wskazywały wyraźnie na około 25%! Podobny problem dotyczył deuteru, który przecież w ogóle nie jest syntetyzowany w gwiazdach, lecz spalany. Poza tym teoria nie wyjaśniała pochodzenia wodoru, zakładała jego istnienie *a priori*, nie była więc kompletna.

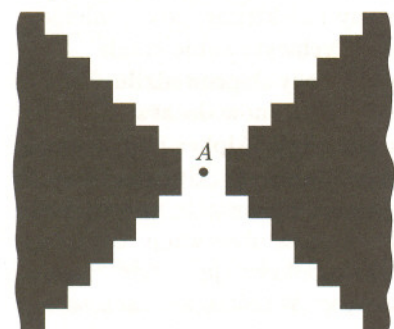
Wreszcie, gdy potwierdzono obserwacyjnie istnienie mikrofalowego promieniowania relikтового, model stanu stacjonarnego został ostatecznie zdyskwalifikowany i teoria α - β - γ powróciła do łask. Była już wtedy dokładniej opracowana i to właśnie na głównych założeniach tej teorii opiera się współczesna standardowa teoria pierwotnej nukleosyntezy. Wiadomo, że miała ona miejsce zaledwie kilka minut po Wielkim Wybuchu, czyli o wiele wcześniej niż powstały wszystkie obiekty astronomiczne. Głównym jej produktem jest hel 4, a to ze względu na jego dużą energię wiązania oraz wspomniany wcześniej brak stabilnych jąder atomowych o liczbach masowych 5 i 8. W znikomej ilości powstaje też lit 7, hel 3 oraz deuter. Produkcji cięższych pierwiastków skutecznie przeciwdziałają bariery kulombowskie.

Obfitości powstałych w czasie pierwotnej nukleosyntezy pierwiastków możemy wyznaczyć z teorii, co wymaga już skomplikowanych obliczeń numerycznych. Obfitości te zależą od panujących we wczesnym Wszechświecie warunków, których, rzecz jasna, dokładnie nie znamy. Wyznaczenie rzeczywistego rozpowszechnienia pierwiastków z obserwacji oraz porównania go z wyznaczonym teoretycznie, przy założeniu pewnych warunków, daje nam zatem informacje o wczesnym Wszechświecie.



Rozwiązanie zadania M 929.

Przykład pokazany jest na rysunku. Każda prosta pozioma (przechodząca przez środki kraterów) jest „prawie w całości” pokolorowana na czarno. Wynika stąd, że prosta pionowa położona odpowiednio daleko od punktu A przecina ją w środku czarnej kratki. Podobnie każda prosta pionowa (przechodząca przez środki kraterów) jest „prawie w całości” pokolorowana na białą. Wynika stąd, że prosta pozioma położona odpowiednio daleko od punktu A przecina ją w środku białej kratki.





Skąd natomiast wzięły się cięższe pierwiastki? W latach 50. E. Salpeter i F. Hoyle opracowali teorię ich syntezy w gwiazdach. Mogą one powstawać pomimo braku stabilnych jąder atomowych o liczbach masowych 5 i 8 dzięki reakcji 3Alfa, w której z trzech jąder helu 4 powstaje jądro węgla 12. Wysoka temperatura i ciśnienie panujące w gwiazdach o masach rzędu masy Słońca i cięższych stwarzają warunki sprzyjające do jej zajścia. W jeszcze masywniejszych gwiazdach przez kolejne przyłączanie jąder helu 4 powstają jądra pierwiastków takich jak tlen, neon czy magnez. W największych i najgorętszych gwiazdach mogą powstawać jeszcze cięższe jądra, do jąder z grupy żelaza włącznie. Na tym jednak kończą się możliwości spokojnej gwiazdowej syntezy. Produkcja cięższych jąder wymaga już doprowadzenia energii z zewnątrz. Energia taka może być uzyskana jedynie podczas wybuchu supernowej. Nie dziwny się więc, że szlachetne metale, takie jak srebro czy złoto, są tak cenne: trzeba było eksplozji o energii rzędu 10^{44} J (o blasku porównywalnym z jasnością galaktyki), by powstały.

Brzeg dowolnej środkowo symetrycznej figury wypukłej mieści się między dwiema elipsoidami jednokładnymi w stosunku \sqrt{n} , gdzie n to wymiar przestrzeni, w której wszystko się odbywa. Na płaszczyźnie więc brzeg dowolnej figury wypukłej mieści się między dwiema elipsami jednokładnymi w stosunku $\sqrt{2}$.

Z krawędzi wielościanu foremnego tworzymy linię łamaną zamkniętą przechodzącą przez wszystkie wierzchołki wielościanu jeden raz. Uważamy za jednakowe te łamane, które dają się nałożyć przez obracanie. Dla czworościanu i sześcianu jest tylko jedna taka łamana, dla dwunastościanu dwie, dla ośmiościanu 3, a dla dwudziestościanu aż 33.

Czytelnicy piszą

W *Delcie* styczniowej z bieżącego roku przypomnieliśmy następujący problem:
przy jakiej ilości płynu w butelce środek ciężkości jest najniższy?

Było też podane tam szczególne rozwiązanie – mianowicie dotyczące sytuacji, gdy butelka (?) ma kształt walca. Sugerowaliśmy też, że podane tam rozwiązanie, czyli:

wtedy, gdy środek ciężkości całości leży na powierzchni płynu

jest prawdziwe nie tylko w rozpatrzonym przypadku i prosiłiśmy Czytelników o podanie ogólnego i prostszego od naszych rachunków rozwiązania.

I rzeczywiście takie rozwiązanie, zawierające *wyniki moich nocnych rozważań* – jak pisze – nadesłał nam Pan Marcin Peczański. Oto ono.

Rozważmy naczynie o dowolnym kształcie napelnione płynem do pewnej wysokości.

Jeżeli poziom płynu w naczyniu leży poniżej środka ciężkości, to dolanie do naczynia niewielkiej ilości płynu spowoduje obniżenie środka ciężkości, gdyż środek ciężkości dodawanego płynu leży poniżej środka ciężkości naczynia z płynem przed dodaniem.

Jeżeli natomiast poziom płynu w naczyniu leży powyżej środka ciężkości, to odlewanie z naczynia niewielkiej ilości płynu spowoduje również obniżenie środka ciężkości, gdyż środek ciężkości ujmowanego płynu leży powyżej środka ciężkości naczynia z płynem przed jego wzięciem.

Z tych dwóch faktów wynika, że podwyższanie poziomu płynu, gdy środek ciężkości leży powyżej tego poziomu, oraz obniżanie poziomu płynu, gdy środek ciężkości leży poniżej tego poziomu, powodują obniżanie położenia środka ciężkości. Zatem środek ciężkości leży najniżej, gdy znajduje się na powierzchni płynu.

c.b.d.u.

Sądzymy, że prostszego rozwiązania raczej już nie ma. Dziękujemy.

Redakcja

P.S. Podobne rozwiązanie przysłał też Pan Adam Smólski.