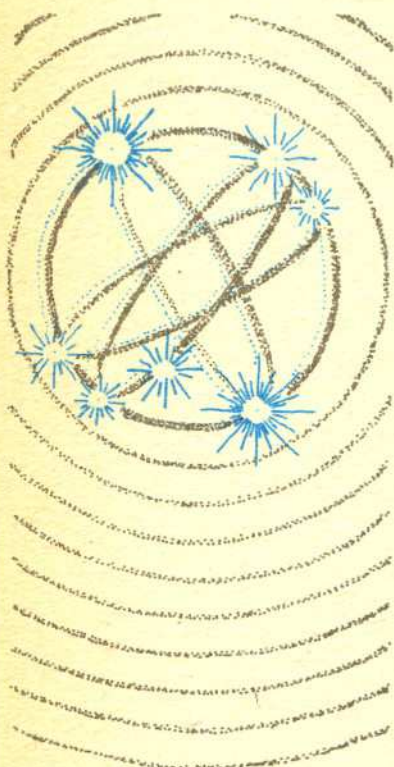
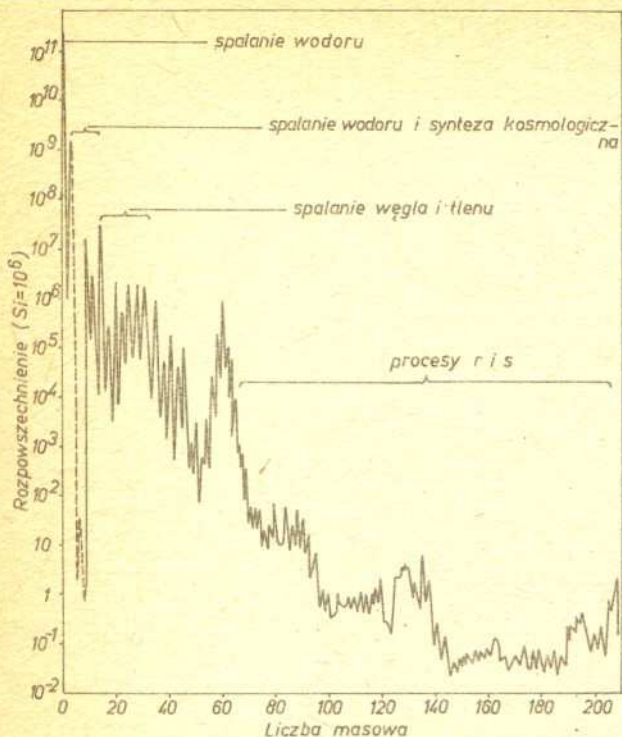


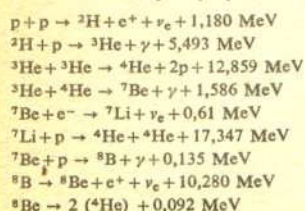
Powstawanie pierwiastków chemicznych

Mgr Andrzej MAJHOFER

Od końca XIX wieku fizycy usiłują wyjaśnić obserwowaną częstość występowania pierwiastków chemicznych w Przyrodzie. Poszukiwania korelacji rozpowszechnienia pierwiastka z jego miejscem w układzie okresowym zakończyły się niepowodzeniem, którego przyczyna stała się jasna po odkryciu jądra atomowego i jego składników: neutronu i protonu. Odpowiedzi należało szukać w zrozumieniu mechanizmów reakcji jądrowych i ich związku z ewolucją Wszechświata. Doskonalone jednocześnie metody obserwacyjne pozwalały badać coraz odleglejsze obszary Wszechświata i na tej podstawie wyznaczać względne rozpowszechnienie izotopów. Wyniki przedstawia wykres. Większość materii stanowią wodór i hel. Częstość występowania innych pierwiastków maleje ze wzrostem masy atomowej poza lokalnymi maksimumami w pobliżu $A = 60$ (najstabilniejsze jądra — żelazo, nikiel), $A = 90$ i $A = 130$ (jądra silnie związane o „magicznych” liczbach neutronów $N = 50$ i $N = 82$) oraz wyraźnym minimum dla jąder litu, berylu i boru.



Cykl p-p



W 1948 roku Ralph Alpher, Hans Bethe i George Gamow rozwinęli teorię powstawania jąder atomowych we wczesnych fazach ewolucji Wszechświata tuż po Wielkim Wybuchu (tak zwana teoria alfa-beta-gamma). Przyjęli oni, że w początkowym stadium ewolucji Wszechświata wypełniony był fotonami i neutronami. Gdy wraz z rozszerzaniem się Wszechświata malały temperatura i gęstość materii, neutrony zaczęły rozpadać się na protony i elektrony (rozpad β^-); następujące potem oddziaływanie neutronów i protonów doprowadziło do powstawania deuteru i trytu. Jądra cięższe w teorii alfa-beta-gamma miały powstawać w wyniku przyłączania kolejnych neutronów i dalszych przemian β^- . W Przyrodzie nie występują jednak stabilne jądra atomowe o liczbach masowych 5 i 8 i wobec tego zaproponowany mechanizm mógł wyjaśnić co najwyżej syntezę helu.

Konkurencyjną teorię wysunęli w 1957 roku Margaret i Geoffrey Burbidge, William Fowler i Fred Hoyle (tak zwana teoria B^2FH). Rozwinęli oni wcześniejsze pomysły Hansa Bethego (z lat 1938—40), który uważał syntezę helu z wodoru za źródło energii gwiazd, i przyjęli, że jądra pierwiastków cięższych od wodoru tworzone są w reakcjach jądrowych zachodzących wewnątrz gwiazd i wyrzucane są w przestrzeń kosmiczną w czasie wybuchów supernowych. Autorzy teorii B^2FH dokładnie przeanalizowali kilka podstawowych typów procesów podając warunki ich występowania i oceniając czasy trwania. Wykorzystali przy tym ówczesną wiedzę o strukturze jąder atomowych i mechanizmach reakcji jądrowych (dane o energiach wiązania, czasach życia i przekrojach czynnych na reakcje wychwytu neutronu lub protonu). Potrafili w ten sposób odtworzyć krzywą rozpowszechnienia izotopów. Badania prowadzone w następnych latach potwierdziły słuszność teorii B^2FH w odniesieniu do ciężkich izotopów, okazało się jednak, że za jej pomocą nie można odtworzyć częstości występowania pierwiastków najlżejszych ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{He}$ i ${}^7\text{Li}$. Robert Wagoner, William Fowler i Fred Hoyle wrócili więc w pracy opublikowanej w 1967 roku do hipotezy syntezy pierwotnej (we wczesnych etapach ewolucji Wszechświata — nazywana również syntezą kosmologiczną). Zbadali oni procesy, które mogły zachodzić w gęstej i gorącej materii przed wytworzeniem się gwiazd, uwzględniając wpływ oddziaływania promieniowania oraz zderzeń między protonami, neutronami i powstającymi jądrami. Rozwinęli w ten sposób starą teorię alfa-beta-gamma i uzupełnili obraz ewolucji Wszechświata w pierwszych minutach jego istnienia. Tak powstała akceptowana

Cykl CNO

- $^{12}\text{C} + \text{p} \rightarrow ^{13}\text{N} + \gamma + 1,944 \text{ MeV}$
- $^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + \text{e}^+ + \nu_e + 1,511 \text{ MeV}$
- $^{12}\text{C} + \text{p} \rightarrow ^{14}\text{N} + \gamma + 7,551 \text{ MeV}$
- $^{14}\text{N} + \text{p} \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma + 7,298 \text{ MeV}$
- $^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + \text{e}^+ + \nu_e + 1,761 \text{ MeV}$
- $^{15}\text{N} + \text{p} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^4\text{He} + 4,966 \text{ MeV}$
- $^{13}\text{N} + \text{p} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma + 0,601 \text{ MeV}$
- $^{16}\text{O} + \text{p} \rightarrow ^{17}\text{F} + \gamma + 0,600 \text{ MeV}$
- $^{17}\text{F} \rightarrow ^{17}\text{O} + \text{e}^+ + \nu_e + 1,822 \text{ MeV}$
- $^{17}\text{O} + \text{p} \rightarrow ^{14}\text{N} + ^4\text{He} + 1,193 \text{ MeV}$

Proces 3 α

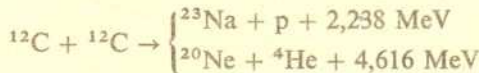
- $^4\text{He} + ^4\text{He} \rightarrow ^8\text{Be} - 0,0921 \text{ MeV}$
- $^8\text{Be} + ^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C} - 0,289 \text{ MeV} \rightarrow ^{12}\text{C} + \gamma + 7,655 \text{ MeV}$
- ($^{12}\text{C}^*$ — oznacza jądro w stanie wzbudzonym)



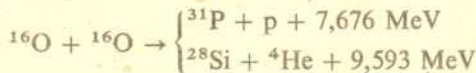
William A. Fowler urodził się w Pittsburghu (Pensylwania) w 1911 roku, doktoryzował się w 1936 w California Institute of Technology, w którym pracuje do dziś.

dziś teoria wiążąca powstawanie izotopów pierwiastków chemicznych z teorią Wielkiego Wybuchu i modelami gwiazd.

Zgodnie z tą teorią w ciągu kilku pierwszych minut istnienia Wszechświata w czasie jego ekspansji i stygnięcia ustalił się obserwowany, obecnie stosunek liczby atomów helu i wodoru. Dalsza synteza helu z wodoru była wynikiem „spalania” wodoru w gwiazdach w procesie p — p lub z udziałem jąder węgla i azotu jako katalizatorów w tak zwanym cyklu CNO. Po wypaleniu wodoru, gdy na skutek zapadania grawitacyjnego wzrasta gęstość i temperatura, rozpoczyna się spalanie helu (proces 3 α). Produkowane jądra węgla ^{12}C mogą przyłączając dalsze cząstki α tworzyć jądra ^{16}O , ^{20}Ne , ^{24}Mg , ^{28}Si i ^{32}S . Gdy temperatura wzrośnie ponad $8 \cdot 10^8 \text{ K}$, rozpoczyna się „spalanie” węgla głównie poprzez reakcje:



Powyżej $2 \cdot 10^9 \text{ K}$ rozpoczyna się „spalanie” tlenu



Dalszy wzrost temperatury i gęstości prowadzi do zwiększenia szybkości zachodzących reakcji rozszczepiania już istniejących i syntezy cięższych jąder. Ustala się wówczas równowaga odpowiadająca zwiększeniu liczby najsilniej związanych jąder; można w ten sposób wyjaśnić lokalne maksimum krzywej rozpowszechnienia pierwiastków dla $A \approx 60$. W rozważanych dotychczas procesach poza coraz cięższymi pierwiastkami produkowana jest również ogromna ilość energii. Synteza jąder cięższych niż żelaza i niklu wymaga dostarczenia energii, może jednak zachodzić we wnętrzu gwiazdy. W teorii B²FH dzieje się to głównie w procesach przyłączania neutronów. W procesie powolnego wychwytu neutronów (proces s od angielskiego słow — powolny) jądro przyłącza neutron, a następnie podlega przemianie β^- ; wielokrotne powtarzanie tego procesu może doprowadzić do powstania izotopów aż do ^{209}Bi — dalszą syntezę uniemożliwia szybki rozpad α produktów. W obecności bardzo dużych strumieni neutronów możliwy staje się bardzo szybki wychwyty kilku do kilkunastu neutronów między przemianami β^- — powstają wówczas jądra o dużym nadmiarze neutronów (proces r od rapid — szybki). Tłumaczy on powstawanie pierwiastków do uranu i toru łącznie.

Wyjaśnienie obserwowanego rozpowszechnienia izotopów wymagało rozpatrzenia wielu procesów zachodzących równolegle w warunkach bardzo odległych od dostępnych w laboratoriach. Konieczność dokładnej znajomości mas i czasów życia jąder nie występujących naturalnie na Ziemi od wielu lat wskazuje kierunki badań teoretycznych i eksperymentalnych.

W 1983 roku Szwedzka Akademia Nauk przyznała nagrodę Nobla z fizyki prof. Williamowi Alfredowi Fowlerowi — jednemu z głównych twórców przedstawionej wyżej teorii.



Rozwiązanie zadania F 152. Oznaczmy: M_s, M_z, m — masy: Słońca, Ziemi, satelity, v_1, v_2 — prędkość Ziemi przed i po wyrzeleniu satelity, r, R — promień Ziemi i jej orbity, G — stała grawitacji.

Zasada zachowania energii dla wszystkich trzech ciał głosi

$$\frac{m}{2} (v + v_2)^2 + \frac{M_z}{2} v_2^2 - \frac{GM_z m}{r} = -\frac{GM_s m}{R} = \frac{M_z}{2} v_1^2,$$

a zasada zachowania pędu

$$m(v + v_2) + M_z v_2 = m\sqrt{2}v_2 + M_z v_2.$$

$\sqrt{2} v_2$ jest tu prędkością ucieczki od Słońca z orbity Ziemi.

Eliminując z tych równań v_2 dostajemy

$$v = [(3 - 2\sqrt{2})v_1^2 + v_1^2]^{1/2} = 16,65 \text{ km/s},$$

gdzie $v_u = \sqrt{2GM_z/r}$ jest prędkością ucieczki z powierzchni Ziemi — tzw. drugą prędkością kosmiczną. Tak znaleziona prędkość v zwana jest trzecią prędkością kosmiczną.



Rozwiązanie zadania M 364. Poszukiwanym kwadratem jest kwadrat AA_1BB_1 z przekątną AB . Mamy w nim $AA_1 + AB + AB_1 + AA = 1 + \sqrt{2}$.

Gdy teraz A leży na boku MN , a B leży na dowolnym boku kwadratu $MNPQ$ o boku a , mamy:

$AM + AN = a, AP \geq a, AQ \geq a$. Równocześnie gdy $AP \leq AQ$, to $AB \leq AQ \leq NQ = a\sqrt{2}$, czyli $a \geq \frac{1}{\sqrt{2}}$ i

$AM + AN + AP + AQ \geq 2a + AQ \geq \sqrt{2} + AB = (\sqrt{2} + 1)$ i w ostatnim wzorze równości mogą zachodzić tylko, gdy $AP = a$ i $AQ = AB$, a więc gdy $A = N, B = Q$.