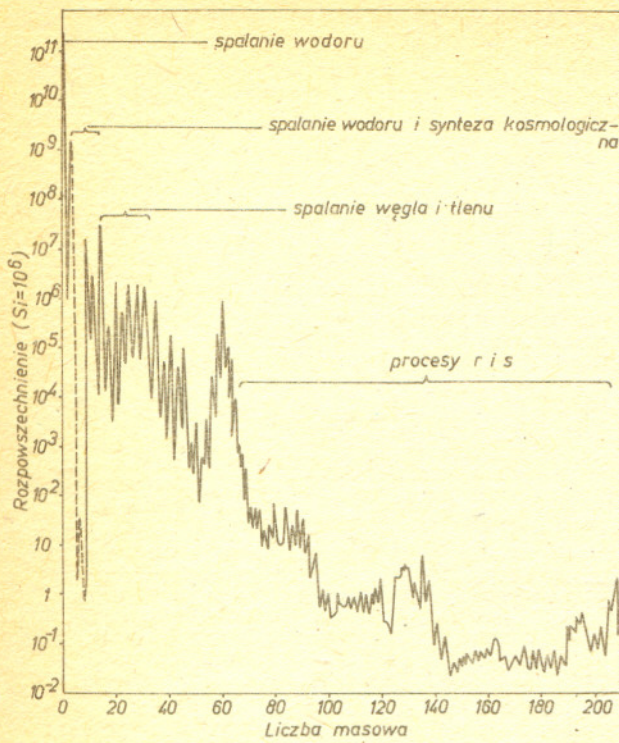
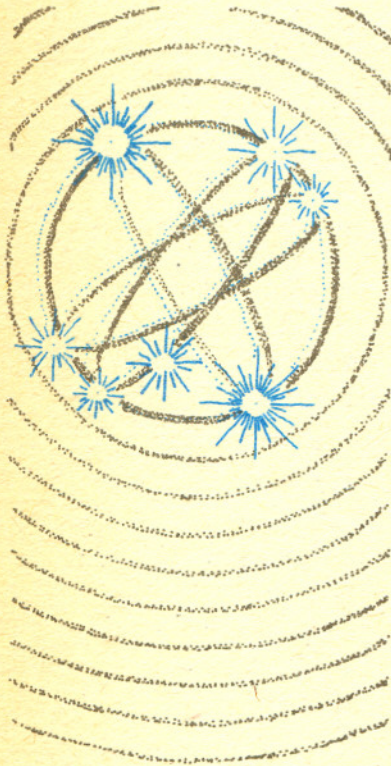


Powstawanie pierwiastków chemicznych

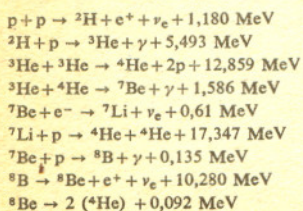
Mgr Andrzej MAJHOFER



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 maksimami 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.



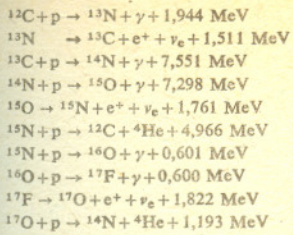
Cykl p-p



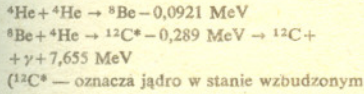
W 1948 roku Ralph Alpher, Hans Bethe i George Gamow rozwinęli teorię powstawania jąder atomowych we wczesnych fazach ewolucji Wszechświata tuż po Wielkim Wybuchu (tak zwana teoria alfa-beta-gamma). Przyjęli oni, że w początkowym stadium ewolucji Wszechświata wypełniony był fotonami i neutronami. Gdy 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



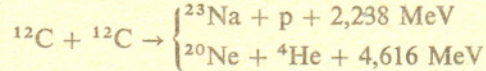
Proces 3α



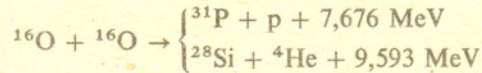
William A. Fowler urodzi\u0142 si\u0119 w Pittsburghu (Pensylwania) w 1911 roku, doktoryzowa\u0142 si\u0119 w 1936 w California Institute of Technology, w kt\u00f3rym pracuje do dzi\u015b.

dzi\u015b teoria wi\u0105z\u0105ca powstawanie izotop\u00f3w pierwiastk\u00f3w chemicznych z teori\u0105 Wielkiego Wybuchu i modelami gwiazd.

Zgodnie z t\u0105 teori\u0105 w ci\u0105gu kilku pierwszych minut istnienia Wszech\u015awiata w czasie jego ekspansji i stygni\u0119cia u\u015bala\u0142 si\u0119 obserwowany, obecnie stosunek liczby atom\u00f3w helu i wodoru. Dalsza synteza helu z wodoru by\u0142a wynikiem „spalania” wodoru w gwiazdach w procesie p — p lub z udzia\u0142em j\u0105der w\u0119gla i azotu jako katalizator\u00f3w w tak zwanym cyklu CNO. Po wypaleniu wodoru, gdy na skutek zapadania grawitacyjnego wzrasta g\u0119sto\u015b\u0107 i temperatura, rozpoczyna si\u0119 spalanie helu (proces 3α). Produkowane j\u0105dra w\u0119gla ^{12}C mog\u0105 przy\u0142czaj\u0105c dalsze cz\u0105stki α tworzy\u0107 j\u0105dra ^{16}O , ^{20}Ne , ^{24}Mg , ^{28}Si i ^{32}S . Gdy temperatura wzro\u015bnie ponad $8 \cdot 10^8 \text{ K}$, rozpoczyna si\u0119 „spalanie” w\u0119gla g\u0142\u00f3wnie poprzez reakcje:



Powy\u017cej $2 \cdot 10^9 \text{ K}$ rozpoczyna si\u0119 „spalanie” tlenu



Dalszy wzrost temperatury i g\u0119sto\u015bci prowadzi do zwi\u0119kszenia szybko\u015bci zachodz\u0105cych reakcji rozszczepiania ju\u017c istniej\u0105cych i syntezy ci\u0119\u017cszych j\u0105der. Ustala si\u0119 w\u00f3wczas r\u00f3wnowaga odpowiadaj\u0105ca zwi\u0119kszeniu liczby najci\u0119\u017ciej zwi\u0105zanych j\u0105der; mo\u017cna w ten spos\u00f3b wyja\u015bni\u0107 lokalne maksimum krzywej rozpowszechnienia pierwiastk\u00f3w dla $A \approx 60$. W rozwa\u017canych dotychczas procesach poza coraz ci\u0119\u017cszymi pierwiastkami produkowana jest r\u00f3wnie\u017c ogromna ilo\u015b\u0107 energii. Synteza j\u0105der ci\u0119\u017cszych ni\u017c \u017celaza i niklu wymaga dostarczenia energii, mo\u017ce jednak zachodzi\u0107 we w\u0119trzu gwiazdy. W teorii B^2FH dzieje si\u0119 to g\u0142\u00f3wnie w procesach przy\u0142czania neutron\u00f3w. W procesie powolnego wychwytu neutron\u00f3w (proces s od angielskiego slow — powolny) j\u0105dro przy\u0142acza neutron, a nast\u0119pnie podlega przemianie β^- ; wielokrotne powtarzanie tego procesu mo\u017ce doprowadzi\u0107 do powstania izotop\u00f3w a\u017c do ^{209}Bi — dalsz\u0105 syntez\u0119 uniemo\u017cliwia szybki rozpad α produkt\u00f3w. W obecno\u015bci bardzo du\u017cych strumieni neutron\u00f3w mo\u017cliwy staje si\u0119 bardzo szybki wychwyty kilku do kilkunastu neutron\u00f3w mi\u0119dzy przemianami β^- — powstaj\u0105 w\u00f3wczas j\u0105dra o du\u017cym nadmiarze neutron\u00f3w (proces r od rapid — szybki). T\u0142umaczy on powstawanie pierwiastk\u00f3w do uranu i toru w\u0142\u0105cznie.

Wyja\u015bnienie obserwowanego rozpowszechnienia izotop\u00f3w wymaga\u0142o rozpatrzenia wielu proces\u00f3w zachodz\u0105cych r\u00f3wnolegle w warunkach bardzo odleg\u0142ych od dost\u0119pnych w laboratoriach. Konieczno\u015b\u0107 dok\u0142adnej znajomo\u015bci mas i czas\u00f3w \u017cy\u0107a j\u0105der nie wyst\u0119puj\u0105cych naturalnie na Ziemi od wielu lat wskazuje kierunki bada\u0144 teoretycznych i eksperymentalnych.

W 1983 roku Szwedzka Akademia Nauk przyzna\u0142a nagrod\u0119 Nobla z fizyki prof. Williamowi Alfredowi Fowlerowi — jednemu z g\u0142\u00f3wnych tw\u00f3rc\u00f3w przedstawionej wy\u017cej teorii.



Rozwi\u0105zanie zadania F 152. Oznaczmy: M_s, M_z, m — masy: S\u0142o\u015bca, Ziemi, satelity, v_1, v_2 — pr\u0119dko\u015b\u0107 Ziemi przed i po wyrzuceniu satelity, r, R — promi\u0119n Ziemi i jej orbity, G — sta\u0142a grawitacji.

Zasada zachowania energii dla wszystkich trzech cia\u0142 g\u0142osi

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

a zasada zachowania p\u0119du

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

$\sqrt{2} v_2$ jest tu pr\u0119dko\u015bci\u0105 ucieczki od S\u0142o\u015bca z orbity Ziemi.

Eliminuj\u0105c z tych r\u00f3wna\u0144 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 pr\u0119dko\u015bci\u0105 ucieczki z powierzchni Ziemi — tzw. drug\u0105 pr\u0119dko\u015bci\u0105 kosmiczn\u0105. Tak znaleziona pr\u0119dko\u015b\u0107 v zwana jest trzeci\u0105 pr\u0119dko\u015bci\u0105 kosmiczn\u0105.



Rozwi\u0105zanie zadania M 364. Poszukiwanym kwadratem jest kwadrat AA_1BB_1 z przek\u0105tn\u0105 AB . Mamy w nim $AA_1 + AB + AB_1 + AA = 1 + \sqrt{2}$.

Gdy teraz A le\u017cy na boku MN , a B le\u017cy na dowolnym boku kwadratu $MNPQ$ o boku a , mamy:

$$AM + AN = a, AP \geq a, AQ \geq a. \text{ R\u00f3wnocze\u015bnie gdy } AP \leq AQ, \text{ to } AB \leq AQ \leq \leq NQ = a\sqrt{2}, \text{ czyli } a \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ i}$$

$AM + AN + AP + AQ \geq 2a + AQ \geq \sqrt{2} + AB = (\sqrt{2} + 1)$ i w ostatnim wzorze r\u00f3wno\u015bci mog\u0105 zachodzi\u0107 tylko, gdy $AP = a$ i $AQ = AB$, a wi\u0119c gdy $A = N, B = Q$.