
... z tak prostych elementów wyjściowych powstało w drodze ewolucji i powstaje nadal nieskończenie wiele najdoskonalszych i najbardziej osobliwych form.

ostatnie zdanie z dzieła Karola Darwina
Powstawanie gatunków w drodze doboru naturalnego (1859)

Jak powstały pierwiastki chemiczne we Wszechświecie? część 2 Geneza pierwiastków ciężkich

Henryk Drozdowski

Wydział Fizyki, Zakład Fizyki Dielektryków, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Streszczenie. Określenie *ciężkie pierwiastki* użyłem w tytule części w takim sensie, w jakim stosują je astrofizycy, którzy dzielą wszystkie pierwiastki na wodór, hel, lit i ... ciężkie. W artykule omawiam związek między tempem ekspansji Kosmosu a powstaniem węgla, który zapoczątkował ścieżkę do wytworzenia niezbędnych pierwiastków do powstania życia. Niestabilność jądra berylu-8 oraz istnienie rezonansowego poziomu wzbudzonego o energii 7,65 MeV w jądrze węgla-12 odegrały decydującą rolę w rozkładzie gęstości występowania nuklidów ciężkich we Wszechświecie. Przedstawiam mechanizm nukleosyntezy pierwiastków ciężkich w reakcjach wychwytu neutronów. Kolejne wychwyty neutronów przez jądra, z następującym po tym rozpadem β^- , są procesem, w którym tworzą się wewnątrz gwiazd wszystkie pierwiastki od żelaza-56 do bizmutu-209 włącznie. Proces *slow* wytwarza jądra atomowe bogate w protony, natomiast proces *rapid* – jądra bogate w neutrony. Tor i uran powstają tylko w czasie wybuchów supernowych. Badając genezę pierwiastków chemicznych we Wszechświecie odnajdujemy ślady naszych prapoczątków. Chciałbym swoje zadziwienie misterną strukturą Wszechświata przekazać Czytelnikowi.

1. Przeszkoda na drodze do ciężkich jąder atomowych

W 1948 roku Ralph Alpher, Hans Bethe i George Gamow rozwinęli teorię powstawania jąder atomowych we wczesnych fazach ewolucji Wszechświata tuż po Wielkim Wybuchu (teoria alfa-beta-gamma) [1]. Założyli oni, że w początkowym stadium ewolucji Kosmos wypełniony był fotonami i neutronami. Wszechświat rozszerzał się, zaś temperatura i gęstość materii malały; neutrony rozpadały się na protony i elektrony (rozpad β^-). Potem oddziaływanie neutronów i protonów doprowadziło do powstania deuteru i trytu. Według teorii alfa-beta-gamma jądra cięższe miały powstawać w wyniku przyłączenia kolejnych neutronów i dalszych przemian β^- . We Wszechświecie nie występują jednak stabilne jądra atomowe o liczbach masowych 5 i 8. Zaproponowany mechanizm mógł więc wytłumaczyć tylko syntezę helu.

Pierwiastki cięższe od ${}^4_2\text{He}$ nie mogły powstać podczas Wielkiego Wybuchu z dwóch powodów. Po pierwsze, nic nie da się dołączyć do bardzo trwałego helu ${}^4_2\text{He}$. O trwałości tego jądra świadczy fakt, że podczas samorzutnej przemiany nie obserwuje się nigdy emisji protonów, deuteronów, jąder trytu lub ${}^3\text{He}$. Jeśli neutron

zbliży się do ${}^4\text{He}$, by utworzyć ${}^5\text{He}$, nie przyłącza się, lecz natychmiast z powrotem odbija. Neutrony i protony odbijają się od jądra helu-4, jak groch od ściany. Ścieżka prowadząca do cięższych jąder, zaczynająca się od dodania protonu lub neutronu do jądra helu-4 w celu stworzenia jądra z pięcioma nukleonami, okazała się zabroniona. Jądro o pięciu nukleonach jest zakazane. W tym miejscu proces syntezy jądrowej się zatrzymał. Po drugie, wyprodukowanie cięższych pierwiastków wymaga utrzymania wysokich temperatur przez czas dłuższy niż trwała początkowa faza Wielkiego Wybuchu. Temperatura Kosmosu spadała tak szybko, że po kilku minutach protony nie miały już energii wystarczającej do zderzenia z siłą wystarczającą do przyłączenia się.

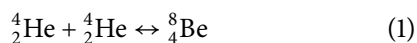
Problem powstania ciężkich pierwiastków zniknąłby, gdyby jądro helu-4 zaabsorbowało jednocześnie neutron i proton, przeskakując niestabilność pięciu nukleonów i bezpośrednio przekształcając się w stabilne jądro litu z sześcioma nukleonami (3 protony i 3 neutrony). Ale szansa na to, że proton i neutron jednocześnie uderzą w odpowiedni sposób w jądro helu, jest niewyobrażalnie mała.

Inny sposób ominięcia etapu pięciu nukleonów mógł polegać na połączeniu się dwóch jąder helu i utworzeniu jądra z ośmioma nukleonami, ale takie jądro również jest z natury niestabilne i rozpada się ponownie na dwa jądra helu. Wszechświat w „złośliwy” sposób postanowił zablokować te dwie najbardziej oczywiste ścieżki prowadzące od jąder lekkich do ciężkich.

Jest to dobre miejsce do refleksji filozoficznej. Warto zauważyć, iż brak stabilnej masy 5 ma zasadnicze znaczenie dla naszego istnienia opartego na węglu. Przypuścimy jednak, że mamy stabilną masę 5. Wówczas podczas pierwszych minut istnienia Wszechświata, który był w tym czasie wypełniony olbrzymią liczbą protonów, proces tworzenia się jąder mógłby zachodzić poprzez wzrost masy o 1, po „jądrowej drabinie”, aż do żelaza. W ten sposób ilości węgla (masa 12) i tlenu (masa 16) nie wyróżniałyby się na tle innych pierwiastków. Fakt, iż potrzeba dużo czasu, aby wytworzyć cięższe pierwiastki, w sposób decydujący zależy od nieistnienia stabilnego jądra o masie 5!

2. Wąskie „gardło berylowe” czyli „feralna ósemka”

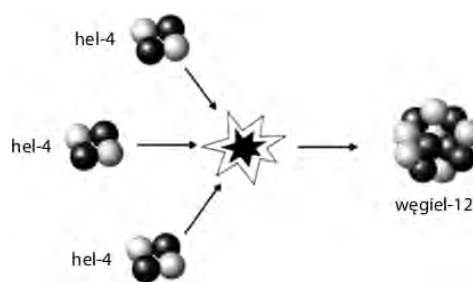
Zderzenie dwóch jąder helu-4 o odpowiednich energiach powinno spowodować utworzenie również bardzo trwałego jądra berylu-8. Ale połączenie dwóch jąder helu jest nietrwałe, gdyż w procesie syntez:



występuje „wąskie gardło”, ponieważ utworzone w ten sposób jądro berylu-8 jest wyjątkowo niestabilne. Ulega niemal natychmiast rozpadowi na lżejsze cząstki α z połowicznym czasem życia 10^{-17} s. Nie było wystarczająco długiego czasu, aby dołączyć do niego jeszcze jedną cząstkę α i utworzyć jądro węgla-12. Podejmowano różne, nawet „desperackie” próby wyjaśnienia tego problemu, ale były one mało wiarygodne [2]. Cała „sprawa berylu” pozostawała w impasie.

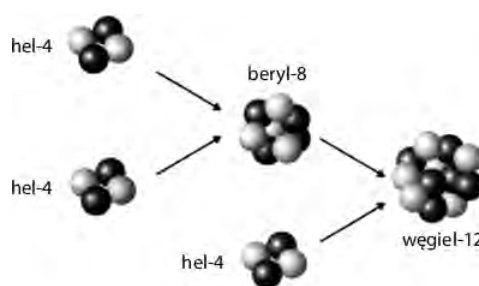
Największą trudnością było pokonanie przeszkody spowodowanej niestabilnością berylu-8. Jak połączyć trzy jądra helu, by utworzyć węgiel, nie przechodząc wcześniej przez stadium dwóch? Mogło to się stać tylko w jeden sposób: przyjmując, że zachodzą zderzenia trzech cząstek alfa, w wyniku czego powstaje jądro węgla-12 (rys. 1). Jednak nie można było skorzystać z tego mechanizmu, ponieważ jest to zdarzenie bardzo mało prawdopodobne. Nawet kilka minut po Wielkim Wybuchu gęstość i temperatura materii były już zbyt małe, aby częstotliwość takich zderzeń była dostatecznie duża i można było w ten sposób wyjaśnić pochodzenie ciężkich pierwiastków.

Mechanizm przejścia przez „feralną ósemkę” zaproponowali na początku lat 50. XX w. niezależnie od siebie:



Rys. 1. Hipotetyczna możliwość powstania węgla, czyli jednoczesne zderzenie trzech jąder helu-4

astrofizyk z Północnej Irlandii, Estończyk z pochodzenia, E. J. Öpik [3] oraz amerykański astrofizyk Edward Salpeter [4]. Stwierdzili oni, że chociaż beryl-8 jest niestabilny, może być obecny w wystarczających ilościach w gorącym i gęstym rdzeniu czerwonych olbrzymów, stanowiąc środowisko do utworzenia się węgla-12. Wówczas jednoczesne zderzenie trzech jąder helu można przedstawić jako proces dwuetapowy (rys. 2): najpierw zachodzi proces (1), przy czym powstające jądro berylu-8 jest wprawdzie nietrwałe, ale we wnętrzu czerwonych olbrzymów, przy wielkiej gęstości i temperaturze odbywa się tyle zderzeń między cząstkami alfa, że jądra berylu-8 stale ulegają odtworzeniu i dochodzi w końcu do ustalenia pewnej równowagi między helem-4 i berylem-8.



Rys. 2. Powstawanie węgla-12 rozpoczynające się od zderzenia dwóch jąder helu-4 i utworzenia berylu-8; z kolei jądro berylu-8 łączy się z jądrem helu-4. Zanim jądro utworzone w fuzji dwóch cząstek α rozpadnie się, zderza się ono z trzecią cząstką α . Taka reakcja jest bardziej prawdopodobna niż równoczesne zderzenie się trzech cząstek

3. Niezwykle gwiazdy – czerwone olbrzymy

Jeżeli masa gwiazdy jest dostatecznie duża, to temperatura osiągnie odpowiednio dużą wartość. W fazie rozwoju, polegającej na spalaniu wodoru, gwiazdy znajdują się na głównym ciągu diagramu Hertzsprunga–Russella. Natomiast w miarę zmiany składu chemicznego gwiazdy, przy wzrastającej w jej jądrze zawartości helu, zaczyna ona schodzić z ciągu głównego diagramu w stronę czerwonych olbrzymów. W fazie olbrzymia jądro gwiazdy kurczy się i rozgrzewa, natomiast zewnętrzna powłoka rozszerza się.

Protony i neutrony tworzące jądra są poddane działaniu przyciągającej siły jądrowej, która ujawnia się na bardzo małych odległościach. Jest to oddziaływanie jądrowe silne, dzięki któremu jądra atomowe są mocno związane. Natomiast między protonami jąder działa bariera potencjału Coulomba, której rola rośnie wraz ze wzrastającą liczbą atomową.

Wynik jakiegokolwiek reakcji jądrowej zależy niemal całkowicie od gęstości i temperatury. Kiedy temperatura jądra gwiazdy wzrośnie do $12 \cdot 10^7$ K, a jego gęstość osiągnie 10^5 g/cm³ (czyli 100 tysięcy razy więcej niż wynosi gęstość wody), przekroczona zostaje bariera coulombowska, czyli zostaje przezwyciężona siła elektrostatycznego odpychania między dwoma jądrami helu. Przy takich wartościach temperatury plazmy i gęstości materii zaczynają się nowe procesy: fuzja jąder helu, opisana równaniem (1). Reakcja ta wymaga wyższych temperatur, gdyż jądra helu, ze względu na dwukrotnie większy ładunek elektryczny, oddziałują silniej niż jądra wodoru – potrzeba zatem wyższych energii, aby pokonać ich elektrostatyczne odpychanie i doprowadzić do fuzji. W temperaturze $12 \cdot 10^7$ K jądra helu-4 pokonują siły wzajemnego odpychania i łączą się tworząc jądro berylu ⁸Be. Jednak ⁸Be nie jest jądrem trwałym i rozpada się ponownie na dwa jądra helu. Beryl ma bardzo krótki czas połowicznego rozpadu (około 10^{-17} s), ale nawet w ciągu tak krótkiego czasu dochodzi do dodatkowego zderzenia i pochłonięcia cząstki alfa. W wyniku tego powstanie jądro ¹²C. Ten proces spalania helu nazywa się potrójnym procesem alfa, ponieważ jądro ⁴He jest także nazywane cząstką alfa oraz ten proces wymaga praktycznie równoczesnego zderzenia tych trzech cząstek (rys. 2). Wewnątrz gwiazd materia pozostaje w stanie o bardzo dużej gęstości i temperaturze przez wiele milionów lat, a zatem nawet w stosunkowo rzadkich zderzeniach trzech cząstek α powstała znacząca ilość węgla.

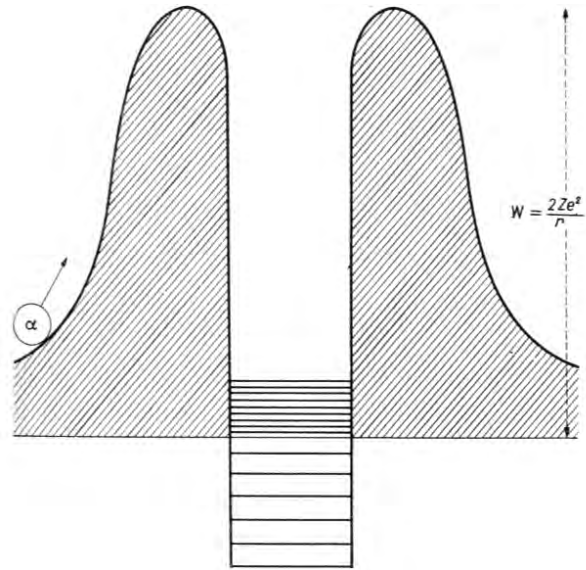
Proces łączenia się berylu z helem (rys. 2) nie może zachodzić w gwiazdach takich jak nasze Słońce, gdyż temperatura w ich wnętrzu jest zbyt niska. Produkcja węgla we wnętrzach masywnych gwiazd jest procesem, który dotyczy nas bezpośrednio. Proces ten wymaga niezwykle precyzyjnego zgrania silnego oddziaływania jądrowego i oddziaływania elektromagnetycznego. Między nadlatującą cząstką a jądrem istnieje coulombowska bariera potencjału, od której wysokości zależy możliwość przeniknięcia cząstki do jądra. Dla ciężkich jąder bariera potencjału jest znacznie większa od energii kinetycznej cząstki α .

Wartość bariery potencjału W (rys. 3) obliczamy z równania:

$$W = \frac{q \cdot Ze}{r}, \quad (2)$$

gdzie: q – ładunek cząstki „atakującej”, Ze – ładunek ją-

dra, r – promień jądra, W – energia potencjalna cząstki względem jądra.



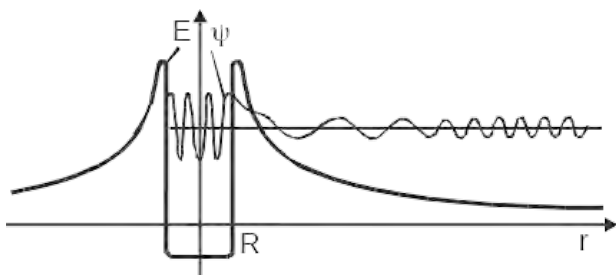
Rys. 3. Bariera potencjału między nadlatującą cząstką α a jądrem atomowym

Jak to jest możliwe, że reakcje jądrowe przebiegają we wnętrzu gwiazdy, choć średnia energia cząstek naładowanych jest znacznie mniejsza od wysokości bariery potencjału? Według fizyki klasycznej procesy takie są niemożliwe, ponieważ cząstka oddziałująca musiałaby mieć energię większą od wysokości bariery potencjału. Atomy, jądra atomowe i cząstki mikroświata podlegają jednak prawom mechaniki kwantowej, które różnią się od praw mechaniki klasycznej, rządzącej zjawiskami świata makroskopowego. Zachodzi tu efekt tunelowy, czyli przeniknięcie cząstki przez barierę potencjału nawet wówczas, gdy energia cząstki jest od tej bariery znacznie mniejsza. Szybkość przebiegu reakcji jądrowych we wnętrzu gwiazd zależy w zasadniczy sposób od efektu tunelowego. W 1928 roku George Gamow podał kwantową teorię zjawiska tunelowego. Dla wyjaśnienia tego zjawiska trzeba cząstce poruszającej się z pewną prędkością przyporządkować falę, która ją reprezentuje. Funkcja falowa ψ cząstki o energii większej od zera, ale mniejszej od maksymalnej wysokości potencjału, która przebywa w obszarze dozwolonym z punktu widzenia fizyki klasycznej, powinna być dopasowana do funkcji falowej cząstki znajdującej się wewnątrz bariery potencjału. Funkcja falowa musi więc przebiegać w sposób ciągły w obu obszarach (rys. 4).

Reakcje syntezy termojądrowej w gwiazdach, zachodzące w temperaturach pomiędzy 10^7 K a 10^9 K, są zjawiskiem kwantowym – zachodzą dzięki przenikaniu bariery coulombowskiej w efekcie tunelowym.

Falowy obraz zjawisk świata mikroskopowego dopuszcza zatem przejście fali przez obszar, w którym jej

przebywanie jest z punktu widzenia fizyki klasycznej za-
bronione. Prawdopodobieństwo przejścia fali określone
jest przez stosunek strumienia cząstek przechodzących
do strumienia cząstek padających.



Rys. 4. Funkcja falowa cząstki przenikającej przez barierę potencjału (E – energia, ψ – funkcja falowa cząstki, R – promień jądra, r – odległość)

Kwantowe tunelowanie przez barierę potencjału elektrostatycznego zachodzi z zauważalnym prawdopodobieństwem wtedy, gdy energia kinetyczna zderzających się jąder jest dana wzorem [5]:

$$E_k = 1,22 \cdot 10^{-4} \left(Z_1^2 Z_2^2 \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2} \right)^{1/3} T^{2/3} \text{ keV.} \quad (3)$$

Jest to wzór na względną energię kinetyczną oddziałujących dwóch jąder. Z równania (3) widać, że E_k rośnie z temperaturą jak $T^{2/3}$.

4. Zjawisko rezonansu w reakcjach jądrowych

Każde jądro atomowe istnieje w pewnych ściśle określonych i skwantowanych poziomach energetycznych, które można sobie wyobrazić jako „drabiny ze szczeblami” ustawionymi w różnej odległości. Może ono zajmować różne poziomy energetyczne, czyli „przeskakiwać” z jednego „szczebla” na inny, pochłaniając albo emitując skwantowane porcje energii, ale nie może zająć pozycji między tymi „szczeblami”. W momencie zderzenia dwóch jąder helu-4 ich całkowita energia jest równa sumie energii odpowiadającej łącznej masie ich jąder oraz energii kinetycznej, z jaką zderzają się one w temperaturze wnętrza gwiazdy. Jeśli jest ona mniejsza od najbliższego dostępnego poziomu, to fuzja obu zderzających się jąder nie nastąpi, jeśli zaś jest większa, to nowo powstałe jądro usuwa jej nadmiar przez wypromieniowanie odpowiedniej porcji energii lub nawet nukleonu. W obu przypadkach konieczność taka zmniejsza prawdopodobieństwo reakcji syntezy.

Masy zderzających się jąder nie można zmienić, jeśli jednak istnieją właściwe warunki termodynamiczne, to całkowita energia nowo powstałego jądra może dokładnie odpowiadać jednemu z jego poziomów energetycznych i wtedy reakcja syntezy nowego jądra przebiega szczególnie wydajnie. Na tym polega zjawisko rezonansu w reakcjach jądrowych [6].

W pobliżu poziomu rezonansowego przekrój czynny określamy za pomocą równania Breit-Wignera [7]:

$$\sigma(x, y) = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{1}{(E - E_r)^2 + (\Gamma/2)^2} \cdot \Gamma_x \Gamma_y, \quad (4)$$

gdzie λ jest długością fali de Broglie’a cząstki padającej, E – energią reakcji syntezy Be-8 i He-4, E_r – energią rezonansową (energia odpowiadająca maksimum przekroju czynnego), Γ_x zaś jest szerokością cząstkową utworzenia jądra złożonego w reakcji termojądrowej, Γ_y – cząstkową szerokością poziomu ze względu na emisję cząstki y lub promieniowania γ , natomiast Γ jest szerokością poziomu energetycznego jądra wzbudzonego. Ze wzoru (4) wynika, że wartości przekrojów czynnych zależą od energii cząstki uderzającej oraz od ładunku i masy jąder bombardowanych. Pierwszy czynnik w tym równaniu jest miarą prawdopodobieństwa utworzenia jądra złożonego i jest proporcjonalny do λ^2 . Czynnik drugi

$$\frac{1}{(E - E_r)^2 + (\Gamma/2)^2} \quad (5)$$

jest czynnikiem rezonansowym i wyraża właściwości rezonansowe. Dla $E = E_r$ mianownik tego wyrażenia ma najmniejszą wartość, a przekrój czynny $\sigma(x, y)$ osiąga maksimum. W miarę wzrostu różnicy między E i E_r mianownik wzrasta, zaś czynnik rezonansowy i przekrój maleją. Trzeci czynnik przedstawia prawdopodobieństwo określonego sposobu rozpadu jądra złożonego i wyraża się za pomocą szerokości cząstkowych Γ_x oraz Γ_y . Przekrój czynny jest miarą prawdopodobieństwa zajścia określonej reakcji jądrowej.

5. Hipoteza Hoyle’a o istnieniu rezonansowego poziomu energii w węglu-12

W 1952 roku Salpeter opublikował pracę na temat syntezy węgla z helu w potrójnym procesie alfa, w której wykazał, że rdzeń czerwonego olbrzyma zawiera jedno jądro berylu-8 na każdy miliard jąder helu. Ponadto stwierdził, że przekrój czynny na powstanie węgla-12 jest zbyt mały, aby mogła powstać duża jego ilość.

Fred Hoyle szczegółowo zbadał proces 3α na podstawie pomiarów spektroskopowych proporcji ciężkich pierwiastków w gwiazdach i obliczył, jak szybko musi zachodzić reakcja z udziałem trzech cząstek alfa. Stwierdził, że zachodzi ona o wiele za wolno, aby potrójny proces alfa – w takiej postaci, jak przedstawił Salpeter – mógł wyprodukować znaczne ilości węgla, które istnieją we Wszechświecie. Obliczono metodami fizyki jądrowej ilość węgla-12, tworzącą się podczas ewolucji gwiazdy, a w następstwie oszacowano kosmiczne rozpowszechnienie węgla. Okazało się jednak, iż jest ono

o rząd wielkości niższe od rzeczywistego. I wtedy właśnie Fred Hoyle w 1953 roku wysunął genialną hipotezę o istnieniu rezonansowego poziomu wzbudzonego jądra węgla-12 w tym przedziale energii, w którym zachodzi efektywne oddziaływanie między jądrami berylu-8 i helu-4 we wnętrzu gwiazdy.

Hoyle pierwszy zrozumiał, że w jądrze węgla-12 musi istnieć stan energetyczny na poziomie dokładnie odpowiadającym stanowi energetycznemu w sytuacji, kiedy jądro ^8Be „absorbuje” inną cząstkę α . Zasugerował, że reakcja syntezy węgla może zachodzić w sposób rezonansowy, czyli musi istnieć wzbudzona postać węgla-12 o takiej masie, która dokładnie odpowiada łącznej masie berylu-8 i helu-4.

Hoyle zdał sobie sprawę, że aby węgiel mógł istnieć we Wszechświecie, musiał powstać we wnętrzu gwiazd i że mogło się to zdarzyć tylko wtedy, gdy precyzyjne „dostrojenie” pozwalało na natychmiastowe „złanie się” trzech jąder ^4He w jedno jądro węgla-12 w stanie wzbudzonym (jądro węgla-12 na pewnym poziomie energetycznym wyższym niż podstawowy). Co więcej, jest to jedyny sposób, by w gwiazdach mogła dokonać się synteza węgla.

Hipoteza Hoyle’a o istnieniu odpowiedniego stanu wzbudzonego jądra węgla bazowała na następującym rozumowaniu. Człowiek istnieje we Wszechświecie. Życie oparte jest na węglu. Dlatego i węgiel istnieje we Wszechświecie, a więc w jakiś sposób musiał powstać. Ale jedyna droga prowadząca do uformowania się węgla wymaga istnienia specyficznego stanu wzbudzenia jego jądra. A zatem taki stan musi istnieć.

Hipoteza Hoyle’a oparta była na argumentach antropocentrycznych: wiązała fakt istnienia człowieka z istnieniem nieznanego wówczas stanu węgla-12 o ściśle określonej energii. W swoim argumentach Hoyle stwierdził, że człowiek częściowo jest zbudowany z węgla, więc odpowiedni stan wzbudzony jądra tego pierwiastka musi istnieć, gdyż w przeciwnym razie nie byłoby ani węgla-12, ani człowieka. Jądro węgla musi mieć jakąś szczególną właściwość, która umożliwia mu powstanie mimo niestabilności jądra berylu-8, co, dzięki czemu węgiel jest tak powszechny we Wszechświecie. Gdyby takie jądro węgla istniało, hel-4 mógłby reagować szybciej z berylem-8, tworząc węgiel-12.

W czasie, kiedy Hoyle podał swoją hipotezę nie było żadnych danych, by stwierdzić, że jądro węgla-12 może istnieć w stanie wzbudzonym.

6. Odkrycie nieznanego poziomu energetycznego węgla-12

W obliczu nieugiętej opozycji wobec hipotezy o istnieniu rezonansowego poziomu energii w węglu-12 Hoyle

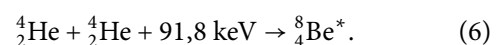
nękał fizyków doświadczalnych z Kellogg Radiation Laboratory (California Institute of Technology) w Pasadenie tak długo, aż wreszcie Willy Fowler ze swoim zespołem podjęli poszukiwania tego stanu. Analizowali oni przebieg zderzeń między jądrami deuteru i azotu-14, w których powstaje węgiel-12 i cząstka alfa. Okazało się, że poziom wzbudzony rzeczywiście istnieje, ale jego energia była o 0,2882 MeV większa od przewidywanej przez Hoyle’a. Fizycy z Caltech zmierzili poziomy energetyczne jądra ^{12}C i znaleźli stan wzbudzony dla wartości 7,6549 MeV. Łączna energia jądra berylu ^8Be oraz cząstki α wynosi 7,3667 MeV. Dodatkowe 0,2882 MeV to właśnie energia kinetyczna jaką wnosi do zderzenia trzecia cząstka α , wprowadzając gładko cały tryplet na odpowiedni poziom energetyczny. Całkowita masa wzbudzonego jądra $^{12}\text{C}^*$ jest więc tylko o 0,2882 MeV wyższa od masy trzech jąder helu.

Fowler, razem z Charlesem Cookiem i C. Lauritsem, potwierdzili eksperymentalnie, że w oddziaływaniach trzech cząstek alfa powstaje jądro węgla w stanie wzbudzonym. Wyprodukowali wzbudzone jądro $^{12}\text{C}^*$ z rozpadu boru-12. Wykazali oni, że część wzbudzonych jąder węgla wraca do stanu podstawowego, ale część rozpada się na trzy cząstki alfa. Takie reakcje jądrowe są odwracalne. Oznacza to, że skoro wzbudzone jądro $^{12}\text{C}^*$ może rozpaść się na trzy cząstki alfa, to również trzy cząstki alfa mogą się połączyć i utworzyć jądro $^{12}\text{C}^*$.

Fowler ze swoim zespołem udowodnił, że w gwiazdach następuje nie tylko przemiana wodoru w hel, ale także helu w węgiel. W 1983 roku Szwedzka Akademia Nauk przyznała Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki Williamowi Alfredowi Fowlerowi za teoretyczne i doświadczalne badania reakcji jądrowych, które miały kluczowe znaczenie w kosmicznej syntezie pierwiastków. Fowler uważany jest za twórcę eksperymentalnej astrofizyki jądrowej [8].

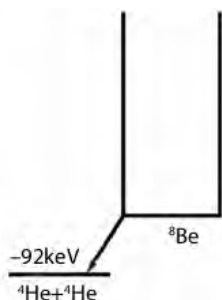
7. Potrójny proces alfa (3α)

Tempo wytwarzania węgla-12 w dwustopniowym potrójnym procesie alfa (rys. 2) zależy od ilości berylu-8, który stanowi tarczę dla cząstek α . Wytwarzanie jądra berylu w tym procesie przedstawia następująca reakcja:



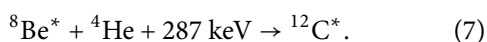
Jest to reakcja endotermiczna o energii progowej rzędu 91,8 keV (rys. 5). Ta reakcja zachodzi tylko wtedy, gdy względna energia kinetyczna obu jąder He – zgodnie ze wzorem (3) – jest równa 91,8 keV.

Jaką rolę odgrywa reakcja (6) w procesie 3α ? Jedyne w warunkach ziemskich jądro ^8Be ma tylko jedną możliwość zaniku: rozpad na dwie cząstki α . W warunkach zaś bardzo gęstej materii wnętrza gwiazdy oraz w wysokiej temperaturze zachodzi tyle zderzeń między ją-

Rys. 5. Powstawanie berylu-8 w procesie 3α

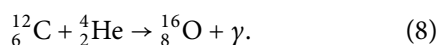
drami helu, że w końcu ustala się pewna równowaga między procesami powstawania i rozpadu berylu, a więc i równowaga między stężeniami helu i berylu. Równowaga ta zależy od gęstości i temperatury.

Przy gęstości 10^5 g/cm^3 i w temperaturze $12 \cdot 10^7 \text{ K}$ przypada – jak wykazał Salpeter – jedno jądro ^8Be na miliard jąder ^4He . W warunkach tak ogromnego stężenia cząstek α jakie istnieje wewnątrz gwiazdy, zanik nietrwałego jądra ^8Be może następować również przez wychwyt cząstki α (zanim beryl zdąży się rozpaść). W ciągu swojego bardzo krótkiego życia jądro berylu-8 może więc wychwycić jądro helu-4 i utworzyć jądro $^{12}\text{C}^*$ w stanie silnie wzbudzonym:

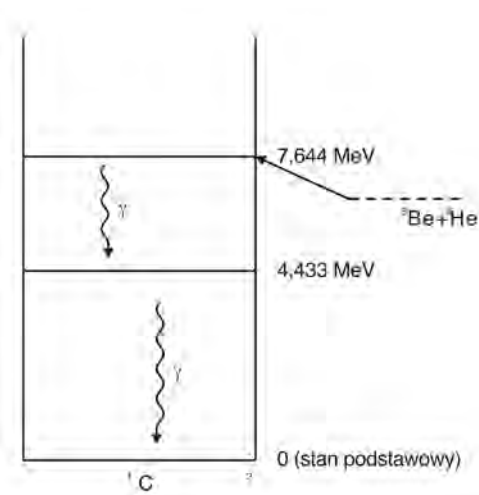


Gwiazdka oznacza tutaj stan wzbudzony jądra węgla, a zatem stan o energii wyższej niż ta, w której to jądro zwykle znajduje się. Reakcje termojądrowe opisane wzorami (6) i (7) zachodzą wówczas, gdy temperatura plazmy helowej wynosi $T = 12 \cdot 10^7 \text{ K}$. Względna energia kinetyczna oddziałujących dwóch jąder Be i He, zgodnie z równaniem (3) wynosi około 287 keV. Ta reakcja również wymaga dostarczenia energii z zewnątrz i jest to energia kinetyczna zderzających się cząstek. W wyniku reakcji (7) powstaje jądro węgla wzbudzone do drugiego poziomu energetycznego ponad stan podstawowy (rys. 6). Reakcja (7) jest więc reakcją rezonansową w przedziale wartości energii, jakimi dysponują jądra ^4He i ^8Be wewnątrz gwiazd spalających hel. Przekrój czynny na tę reakcję jest tak duży, że jądra węgla powstają z dużą wydajnością, mimo niewielkiego stężenia jąder berylu.

Jednocześnie możliwe stało się przyłączanie dalszych cząstek α do wytworzonych już jąder węgla; w tej reakcji powstaje tlen-16:



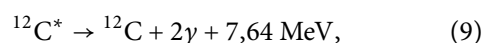
Poziom wzbudzony 7,6549 MeV w jądrze węgla-12 przyspiesza oddziaływanie niestabilnego jądra berylu-8 z trzecią cząstką alfa. Gdyby nie ten poziom, powstawanie jądra węgla przebiegałoby na tyle wolno, że zdążyłby

Rys. 6. Powstawanie wzbudzonego jądra węgla w procesie 3α

on przereagować z kolejną cząstką alfa tworząc tlen-16 w reakcji (8), w wyniku czego obfitość węgla we Wszechświecie byłaby o wiele niższa od tej, którą faktycznie obserwujemy.

Hoyle wykazał, że reakcja (8) musi przebiegać ze ściśle określoną szybkością. Uwarunkowane jest to tym, że jądro tlenu nie ma poziomu energetycznego odpowiadającego rezonansowi reakcji. Posiada natomiast poziom wzbudzenia bardzo bliski punktu krytycznego, wyznaczonego przez sumę energii węgla-12 i helu-4, odpowiadającego energii 7,1616 MeV [9]. Eksperymentalnie potwierdzona energia poziomu wzbudzenia jądra tlenu wynosi 7,1187 MeV, czyli jest tylko o 0,0429 MeV mniejsza od energii reakcji syntezy tlenu. Rezonans energii więc nie występuje. Wysoka temperatura panująca wewnątrz czerwonego olbrzyma może jedynie dodać energię kinetyczną do całkowitej energii obu jąder, lecz nie może zmniejszyć ich łącznej energii; suma energii węgla-12 i helu-4 w żaden sposób nie może „zejść” do wartości 7,1187 MeV. Gdyby energia stanu wzbudzonego tlenu-16 była nieco większa niż 7,1187 MeV, a nie mniejsza od 7,1616 MeV, reakcja węgla-12 i helu-4 byłaby rezonansowa i cały węgiel w gwiazdach przemieniłby się niezwłocznie w tlen-16. Węgiel został ocalony w ostatniej chwili! W gwiazdach zaistniała bardzo delikatna równowaga, która zapewniła, że tlen nie powstał za szybko w zbyt dużych ilościach, a węgiel za wolno w zbyt małych.

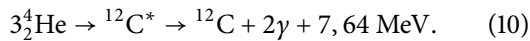
Jedynie niewielka część jąder węgla ulega deekscytacji, czyli przechodzi do stanu podstawowego:



emitując kolejno dwa fotony γ (rys. 6).

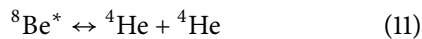
W rzeczywistości do utworzenia stabilnego jądra węgla potrzeba aż trzech jąder helu, które łączą się tworząc stan wzbudzony jądra węgla, który następnie oddaje

energii i przechodzi do swego stanu podstawowego:



Trzy reakcje Salpetera opisane równaniami (6), (7) i (10) tworzą potrójny proces alfa (3α).

Z teorii budowy gwiazd wynikało, że gdyby jądro berylu-8 było trwałe cały hel uległby natychmiastowej transformacji w węgiel. Przemiana helu w węgiel miałaby niezwykle gwałtowny przebieg (uwolnienie ogromnych ilości energii jądrowej). Gwiazda, w której zachodzi spalanie helu, uległaby rozerwaniu, a tym samym niemożliwa byłaby synteza dalszych pierwiastków, takich jak magnez, siarka, wapń i żelazo. Jądro Be-8 jest jednak niestabilne i rozpada się szybko na dwa jądra helu, spalanie helu zaś przebiega spokojnie i powoli. W rzeczywistości zatem mamy do czynienia z reakcją odwracalną:



W procesie trzech alfa dodanie do nietrwałego jądra $\text{}^8\text{Be}$ trzeciej cząstki α (rys. 2) dostarcza odpowiedniej porcji energii, aby spowodować przejście takiego kombinowanego jądra w stan wzbudzonego węgla $\text{}^{12}\text{C}^*$. Przypomina to sytuację, w której atom absorbuje foton i przechodzi na wyższy stan energetyczny.

8. Refleksja filozoficzna: kosmiczne koincydencje są subtelnie dostrojone

Niezwykły zbieg właściwości trzech rodzajów jąder biorących udział w reakcji: berylu-8, węgla-12 i tlenu-16, zadecydował o tym, że we Wszechświecie wytworzyło się ponad 20 pierwiastków niezbędnych do powstania życia.

Powstanie węgla i ponad dwudziestu niezbędnych do istnienia życia ciężkich pierwiastków zależało od następujących nieoczekiwanych, delikatnych dostrojzeń: odpowiednio wysoka temperatura plazmy helowej $12 \cdot 10^7 \text{ K}$ we wnętrzu czerwonego olbrzyma była niezbędna, aby w reakcjach termojądrowych między $\text{}^8\text{Be}^*$ i $\text{}^4\text{He}$ powstały we wnętrzu gwiazdy mierzalne ilości jąder węgla-12. Reakcje termojądrowe zachodzą wówczas, gdy przy danej temperaturze plazmy względna energia kinetyczna oddziałujących dwóch jąder $\text{}^8\text{Be}^*$ i $\text{}^4\text{He}$ wynosi około 287 keV. Temperatura plazmy wewnątrz czerwonego olbrzyma jest dopasowana do energii progowej (około 287 keV) reakcji termojądrowej $\text{}^8\text{Be}^*$ i $\text{}^4\text{He}$. Przy takim zestrojeniu energia ruchu obu tych jąder podnosi ich łączną energię i następuje przejście do poziomu wzbudzonego jądra $\text{}^{12}\text{C}^*$. Z kolei energia stanu wzbudzonego $\text{}^{12}\text{C}^*$ jest dokładnie dopasowana do energii, w której zachodzą efektywne oddziaływania między jądrami $\text{}^8\text{Be}^*$ i $\text{}^4\text{He}$ we wnętrzu rdzenia helowego czerwonego olbrzyma. Wówczas ogromnie wzrasta przekrój

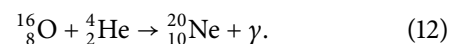
czynny na powstanie $\text{}^{12}\text{C}^*$ w zderzeniu trzech cząstek alfa. Przekształcenie trzech jąder $\text{}^4\text{He}$ w jądro węgla jest wtedy bardzo przyspieszone. Rezonans jądrowy stwarza niezwykle wąskie „okno”, trwające 10^{-17} s , podczas którego cały proces musi się dokonać. Bez tego „okna” nie byłoby szans na nasze zaistnienie. Bez zjawiska rezonansu węglowego nie byłoby we Wszechświecie ciężkich pierwiastków i nie byłoby nas. Hoyle mówił, iż odkrycie rezonansu węglowego było dlań takim wstrząsem, że zachwiało jego ateizmem. W 1981 roku w California Institute of Technology powiedział: *Jeśli podczas zachodzącej w gwiazdach nukleosyntezy chcemy produkować węgiel i tlen w przybliżeniu w takich samych ilościach, to trzeba ustalić właśnie te dwie wartości i to na dokładnym poziomie, na jakim – jak się okazuje – rzeczywiście istnieją. (...) Interpretacja zdroworozsądkowa tych faktów sugeruje, że nie ma w przyrodzie ślepo działających sił, o których warto by mówić. Liczby, jakie można otrzymać opierając się na faktach, wydają mi się tak przytłaczające, że sprawiają, iż taka konkluzja pozostaje prawie poza wszelką wątpliwością [10].*

Energia stanu wzbudzonego jądra $\text{}^{12}\text{C}^*$ zależy od intensywności siły jądrowej, która wiąże ze sobą protony i neutrony. Gdyby poziom rezonansowy węgla był zaledwie o 4% niższy, atomy węgla nie powstałyby. Gdyby zaś był zaledwie o 0,5% wyższy, to cały węgiel zostałby „wypłukany”, to znaczy, że połączyłby się z helem dając tlen.

Prawa rządzące Wszechświatem w zastanawiającym stopniu sprzyjają powstaniu węgla, a więc życia. Proces powstawania węgla w masywnych gwiazdach wymagał niezwykle precyzyjnego zgrania silnego oddziaływania jądrowego i oddziaływania elektromagnetycznego.

9. Proces alfa i dalsze jądra alfowe

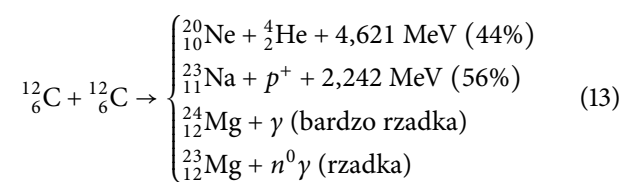
Proces budowy pierwiastków polegający na dodawaniu cząstek α , został nazwany *procesem alfa* [8]. Spalanie helu nie kończyło się na wytworzeniu węgla. Wraz z nagromadzeniem się węgla, coraz większą rolę odgrywała przemiana (8). Do wytworzonego z kolei na tej drodze trwałego jądra izotopu tlenu $\text{}^{16}_8\text{O}$ „wbijało się” następne jądro helu tworząc jądro neonu:



Oprócz tlenu-16 i neonu-20 powstały dzięki procesowi alfa jądra: $\text{}^{24}\text{Mg}$, $\text{}^{28}\text{Si}$, $\text{}^{32}\text{S}$, $\text{}^{36}\text{Ar}$, $\text{}^{40}\text{Ca}$.

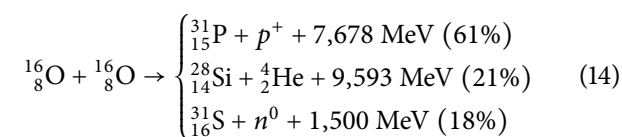
Kiedy hel w jądrze gwiazdy został wyczerpany i pozostał głównie węgiel i tlen, wtedy i te „popioły” pozostałe po helu uległy „zapaleniu”. Gdy temperatura wzrosła ponad $8 \cdot 10^8 \text{ K}$, rozpoczęło się „spalanie” („zapłon”)

węgla głównie poprzez reakcje [8]:



W reakcjach (13) produkowane są: neon-20 i jądro ${}^4_2\text{He}$ lub sód-23 i proton albo rzadko magnez-24 oraz magnez-23 i neutron.

Powyżej temperatury $2 \cdot 10^9$ K rozpoczęło się „spalanie” tlenu [9]:



W nawiasach przy reakcjach (13) i (14) podano częstotliwość występowania poszczególnych procesów w warunkach gwiazdnych. Częstotliwość tę ustala się z wyników przeprowadzenia danej reakcji w laboratorium.

Dalszy wzrost temperatury i gęstości prowadził do zwiększenia szybkości zachodzących reakcji rozszczepiania już istniejących i syntezy cięższych jąder. Ustaliła się wówczas równowaga odpowiadająca zwiększeniu liczby najsilniej związanych jąder; w ten sposób wyjaśniamy występowanie lokalnego maksimum na krzywej rozpowszechnienia pierwiastków dla $A \approx 60$ (rys. 1, część 1 artykułu).

W analizowanych dotychczas procesach, poza coraz cięższymi pierwiastkami produkowana jest również ogromna ilość energii. Synteza jąder cięższych niż żelaza i niklu wymagała dostarczenia energii. Przez wiele lat nikt nie rozumiał, skąd wzięły się takie pierwiastki jak platyna, złoto czy uran. Są one cięższe od żelaza i musiałyby powstać przez sukcesywne dodawanie nukleonów do jądra żelaza.

Taka koncepcja natrafiła jednak na dwa poważne problemy. Pierwszy problem z powstawaniem bardzo ciężkich pierwiastków wiązał się ze stabilnością gwiazd. Jądra grupy żelaza stanowią najsilniej związane jądra w Kosmosie; przekształcenie w cięższe jądra jest równoznaczne z dostarczeniem im energii. Problem polega na tym, że fundamentem stabilności gwiazd są reakcje jądrowe, które wydzielają energię. Powstałe w ich wyniku ciepło wytwarza ciśnienie, które przeciwstawia się grawitacji. Trudno więc było zrozumieć, dlaczego gwiazdy miałyby realizować reakcje, które wiążą się z pochłanianiem energii.

Drugi problem wiązał się z temperaturą. Utworzenie ciężkiego pierwiastka wymaga „sklejenia” ze sobą ciężkich jąder. Im jądra są cięższe, tym większe mają ładunki

elektryczne, a więc tym silniejsze jest elektryczne odpychanie.

Powyższe dwa problemy stanowiły fundamentalną granicę, poza którą budowa pierwiastków nie mogła zachodzić przez zderzenie ze sobą elektrycznie naładowanych jąder. Najcięższe pierwiastki we Wszechświecie nie mogły w ten sposób powstać.

10. Nukleosynteza pierwiastków ciężkich w reakcjach wychwytu neutronów

Zanim utworzyły się pierwsze gwiazdy, ośrodek międzygwiazdowy zawierał jedynie oba trwałe izotopy wodoru, również dwa izotopy helu, znikome ilości litu i żadnych cięższych pierwiastków. W czasie, gdy gwiazdy pierwszego pokolenia o największej masie zakończyły swoją ewolucję, w ośrodku międzygwiazdowym występowały już pierwiastki cięższe od helu, aż do żelazowców włącznie. Gdy powstawały nowe gwiazdy (drugiego pokolenia), to już od początku swego istnienia zawierały w sobie pewną domieszkę pierwiastków cięższych aż do $Z \leq 30$. Jedyną różnicą pomiędzy ewolucją gwiazdy pierwszego a ewolucją gwiazdy drugiego pokolenia, z punktu widzenia nukleosyntezy pierwiastków ciężkich, jest wykorzystanie neutronów.

Jaki był los neutronu, gdy pojawił się w wyniku reakcji jądrowej w gwieździe pierwszego pokolenia? Obecne były tylko jądra kilku pierwszych pierwiastków lekkich o małych przekrojach czynnych na wychwyt neutronu. Neutrony rozprasały się na jądrach, aż wreszcie doszło do rozpadu - z neutronu powstał proton.

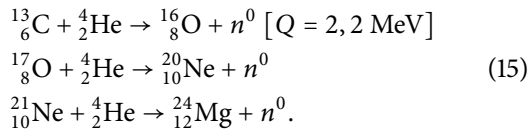
Odmienne były losy neutronów w gwiazdach drugiego pokolenia. Jądra żelazowców mają duże przekroje czynne na wychwyt neutronów. Wszystkie jądra cięższe łatwo wychwytywały neutrony zanim zdążyły się rozpaść. Na tej drodze doszło do powstawania jąder pierwiastków cięższych.

W 1957 roku Margaret i Geoffrey Burbidge, William Fowler i Fred Hoyle ogłosili teorię (tak zwana teoria B^2FH) [5] powstawania pierwiastków cięższych. Rozwinęli oni koncepcje Hansa Bethego [11], który uważał syntezę helu z wodoru za źródło energii gwiazd, i przyjęli, że jądra pierwiastków cięższych od wodoru powstawały w reakcjach jądrowych zachodzących wewnątrz gwiazd i wyrzucane były w przestrzeń kosmiczną w czasie wybuchów supernowych. Autorzy teorii B^2FH przeanalizowali podstawowe reakcje podając warunki ich występowania i oceniając czasy ich trwania. Wykorzystali ówczesną wiedzę o strukturze jąder atomowych i mechanizmach reakcji jądrowych (informacje o energiach wiązania, czasach życia i przekrojach czynnych na reakcje wychwyty neutronu lub protonu). W ten sposób odtworzyli krzywą rozpo-

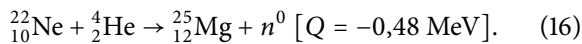
wszechnienia ciężkich izotopów (rys. 1, część pierwsza artykułu).

W teorii B²FH autorzy rozwiązali problem powstania jąder ciężkich wykorzystując zjawisko wychwytu neutronów. Neutrony są cząstkami nietrwałymi ($T_{1/2} \approx 10,8$ min) i pozbawionymi ładunku, nie podlegają zatem odpychaniu coulombowskiemu.

Źródłami swobodnych neutronów są następujące reakcje jądrowe, zachodzące podczas „spalania” helu:

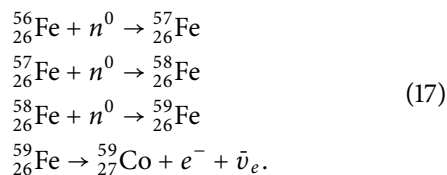


Węgiel-13 stanowi rzadką formę węgla; wytwarzany jest w cyklu węglowo-azotowo-tlenowym CNO: ${}^{13}\text{N} = {}^{13}\text{C} + e^+$ [11]. Reakcje (15) są powszechnie uważane za źródło neutronów niezbędnych do budowy pierwiastków ciężkich w czerwonych olbrzymach o masach mniejszych niż ośmiokrotna masa Słońca. W czerwonych nadolbrzymach, gwiazdach o masach większych od ośmiokrotnej masy Słońca, źródło swobodnych neutronów stanowi reakcja rzadkiego izotopu neonu-22 oraz helu, w wyniku której powstaje magnez-25 i neutron [12]:

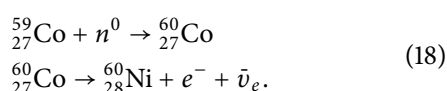


Procesy opisane reakcjami (15) i (16) zachodzą w powłoce czerwonych olbrzymów. Gęstości neutronów powstałych w tych reakcjach osiągają w gwiazdach tylko wartości 10^8 g/cm³. Neutrony są wychwytywane przez jądra atomowe różnych pierwiastków, w wyniku czego powstają cięższe izotopy.

Jeżeli jądro żelaza ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ pochłonie trzy neutrony, stanie się nietrwałe. Powstałe jądro ${}^{59}_{26}\text{Fe}$ stało się jądrem o nadmiarze trzech neutronów i wówczas zachodzi rozpad promieniotwórczy β^- , który powoduje przemianę jądra ${}^{59}_{26}\text{Fe}$ w znajdujący się bezpośrednio wyżej w układzie pierwiastków Mendelejewa kobalt ${}^{59}_{27}\text{Co}$:



W ten sposób jądro neutrononadmiarowe staje się jądrem stabilnym. Jeśli jądro kobaltu-59 przyłączy neutron, stanie się nietrwałe i również nastąpi rozpad β^- . Jądro kobaltu-59 przekształci się w jądro niklu-60:

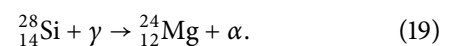


Aby proces powolnego „wdrapywania się” jąder ku coraz wyższym wartościom Z i N wzdłuż ścieżki stabilności był skuteczny, jądra nie mogą się zbyt szybko rozpaść w procesie β^- . Musi istnieć możliwość wychwytu następnego neutronu. Podczas trwania tego procesu jądra atomowe oddalają się od ścieżki stabilności o jedną, dwie lub trzy wartości liczby neutronów N ; gdy tylko się od ścieżki stabilności oddalą, przemiana β^- sprowadza je z powrotem na tę ścieżkę. Mimo dużych przekrojów czynnych na reakcje (17) i (18) wychwytywanie neutronu zachodzi średnio w odstępach dni, lat a nawet kilkudziesięciu lat. Procesy wychwytywania neutronów, które analizujemy (17) i (18) nazywamy *procesami typu s* (slow – powolny) i to nie dlatego, że neutrony poruszają się powoli, ale że wychwytywanie neutronów zachodzi zbyt rzadko. Neutrony w gwiazdach mają dostatecznie dużą energię (od kilku do kilkuset keV), aby być wychwytywane. Odstęp czasu między poszczególnymi wychwytywaniami jest tak długi, że nowo powstałe jądro ulega przemianie β^- zanim wychwyci następny neutron.

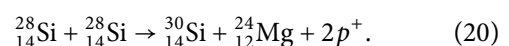
Kolejne wychwytywanie neutronów przez jądra, z następującym po tym rozpadem β^- , są procesami, w których tworzą się wewnątrz gwiazd wszystkie pozostałe pierwiastki do bizmutu-209 włącznie. Bizmut ${}^{209}_{83}\text{Bi}$ jest najcięższym jądrem, które może powstać w procesie s . Ten proces nie może przebiegać dalej, ponieważ następne pierwiastki (za bizmutem) są wyłącznie promieniotwórcze; polon i astat są krótkożyciowe. Polon rozpada się do ołowiu. Im cięższe są jądra atomowe, tym czasy życia ze względu na rozpad β^- stają się coraz krótsze. Procesy s są zbyt wolne. Nie było możliwości wytworzenia na tej drodze pierwiastków cięższych od bizmutu. Kiedy wystąpiły zatem warunki umożliwiające powstanie najcięższych pierwiastków?

11. Wybuchy supernowych

Tylko gwiazdy masywne mogły utworzyć w swoim głębokim wnętrzu odpowiednią ilość „popiołu jądrowego”, czyli krzemu. Gdy ta odpowiednia ilość „popiołu” została osiągnięta nastąpiło jego zapalenie. Wzrost masy tego „popiołu” w centrum gwiazdy spowodował jego zgniatanie pod wpływem sił ciężkości. W zgniacym „popiele” wzrosła temperatura oraz gęstość, a więc istniało podwyższone ciśnienie. Gdy temperatura w centrum gwiazdy osiągnęła około $4 \cdot 10^9$ K rozpoczęła się olbrzymia liczba różnych reakcji termojądrowych. Zachodziły również reakcje fotorozszczepiania jąder krzemu:



Nastąpiło spalanie krzemu:

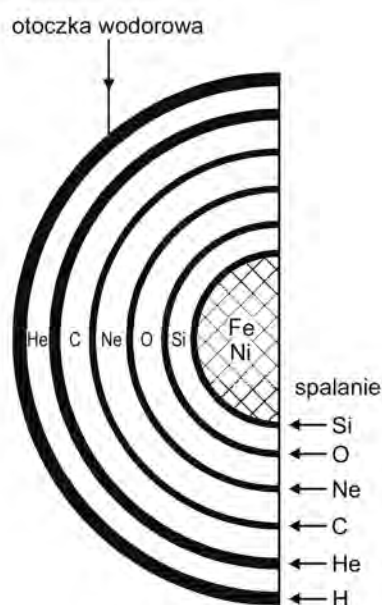


Dzięki cząstkom α pojawiającym się w reakcji (19) izotop $^{28}_{14}\text{Si}$ przekształcił się w $^{30}_{14}\text{Si}$. Wynikiem spalania krzemu jest produkcja jąder z obszaru żelaza, o liczbach masowych A z przedziału $30 \div 60$.

Gwiazda masywna kończy żywot jako struktura warstwowa (rys. 7) [13, 14]. Posiada wówczas żelazno-niklowe (Fe-Ni) jądro otoczone współśrodkowymi warstwami stopniowo coraz lżejszych pierwiastków. W rdzeniu czerwonego nadolbrzyna o masie około 1,5 mas Słońca panują warunki ekstremalne. Temperatura w centrum osiąga $T \approx 7 \cdot 10^9$ K, gęstość zaś wynosi $\rho \approx 5\,000\,000$ kg/cm³. Rdzeń Fe-Ni jest plazmą złożoną z jąder żelaza, niklu i elektronów.

Plazma żelazno-niklowa stanowi ostateczny produkt nukleosyntezy. Zapalenie tej plazmy jest niemożliwe; „popiół” Fe-Ni nie może się zapalić. Ponieważ w ekstremalnych warunkach temperatury i gęstości zachodzą dwa ważne procesy: dysocjacja jąder Fe i Ni oraz wychwyty elektronów w odwrotnym rozpadzie β^+ . Dysocjacja jąder Fe i Ni jest reakcją endotermiczną. Oba te procesy prowadzą do obniżenia ciśnienia plazmy i neutronizacji materii [13].

W konsekwencji zostaje naruszona równowaga między siłami grawitacji i ciśnienia: siły grawitacji zwyciężają i rdzeń Fe-Ni ulega gwałtownej implozji. Na ten niezwykle gęsty rdzeń gwiazdy spadają pod wpływem siły ciężkości kolejne jej warstwy. Pod ich ciężarem rdzeń ulega lekkiemu ściśnięciu, a następnie gwałtownie „sprężynuje” odbijając od siebie stykającą się z nim bezpośrednio warstwę materii. Implozja rdzenia gwiazdy zamienia się w wybuch jej otoczki [13].



Rys. 7. Struktura rdzenia czerwonego nadolbrzyna bezpośrednio przed implozją

Następuje katastroficzny „zawał” gwiazdy, który trwa krócej niż sekundę [9]. Gwiazda masywna rozpada się w gigantycznej eksplozji, zwanej eksplozją supernowej. W wyniku wielkiej implozji ogromna część materii wyrzucana jest na zewnątrz. Gwiazda w zależności od swojej masy staje się czarną dziurą lub gwiazdą neutronową. W krótkim czasie trwania wybuchu supernowej powstaje też olbrzymia ilość neutronów: 10^{20} cm⁻³. Bardzo duże gęstości neutronów powodują, iż wychwyty neutronów stają się bardzo częste. Zachodzą gwałtowne procesy, w wyniku których produkowane są – w bardzo krótkich odstępach czasu – najcięższe znane pierwiastki. Są to procesy typu *r* (*rapid* – szybki) wychwyty szybkich neutronów; ich energia zawiera się w obszarze 10–20 MeV! Proces ten jest tak szybki, że neutrony są gwałtownie chwytywane przez jądra ołowiu i bizmutu, czemu towarzyszy wytwarzanie wszystkich najcięższych pierwiastków [8]. Pierwiastki nietrwałe między bizmutem i torem (polon, astat, radon, frans, rad i aktyn) nie mają czasu na rozpad. Tor i uran powstają tylko w czasie wybuchów supernowych.

12. Podsumowanie

Z przedstawionej historii pojawienia się pierwiastków chemicznych we Wszechświecie wynika, że powstawały one w następujących procesach: najlżejsze (jednoprotonowe jądro wodoru, deuter, hel-3, hel-4, lit-7) w pierwotnej nukleosyntezie kosmicznej po Wielkim Wybuchu; wewnątrz gwiazd w reakcjach jądrowych prowadzących do syntezy jąder do żelaza włącznie; w procesach wychwyty neutronów *slow* i *rapid* (pierwiastki cięższe od żelaza), przy czym neutrony powstawały w różnych stadiach ewolucji gwiazd lub w wyniku wybuchu supernowej. W omawianych procesach powstały 264 stabilne izotopy tworzące 92 pierwiastki.

Pojawienie się takich pierwiastków jak tlen, którym oddychamy, żelazo będące elementem ludzkiej krwi, uran używany w reaktorach, nastąpiło w czasie aktywnego życia gwiazd i kończących to życie wybuchów. Co więcej, sam człowiek zbudowany jest z materii, która powstała w gwiazdach. Każdy atom naszego ciała, z wyjątkiem pierwotnego wodoru, został wytworzony we wnętrzu gwiazdy.

Literatura

- [1] R. A. Alpher, H. Bethe, G. Gamow, *The Origin of Chemical Elements*, Phys. Rev. 73, 803–804 (1948).
- [2] A. H. Guth, *Wszechświat Inflacyjny. W poszukiwaniu nowej teorii pochodzenia Kosmosu*, Prószyński i S-ka 2000.

- [3] E. J. Öpik, Proc. Roy. Iris Acad. A54, 49 (1951).
- [4] E. E. Salpeter, Astrophys. J. 115, 326 (1952); Ann. Rev. Nuclear Sci. 2, 41 (1953).
- [5] E. M. Burbidge, G.R. Burbidge, W.A. Fowler, F. Hoyle, *Synthesis of the Elements in Stars*, Rev. Mod. Phys. 29, 547–650 (1957).
- [6] B. R. Martin, *Nuclear and Particle Physics*, Second Edition, John Wiley & Sons Ltd 2009.
- [7] A. Strzałkowski, *Wstęp do fizyki jądra atomowego*, PWN 1978.
- [8] C. R. Cowley, *An Introduction to Cosmochemistry*, Cambridge University Press 1995.
- [9] B. E. J. Pagel, *Nucleosynthesis and the Chemical Evolution of Galaxies*, Cambridge University Press 1997.
- [10] F. Hoyle, *The Universe: Past and Present Reflections*, Engineering & Science, 11, 12 (1981).
- [11] H. Bethe, *Energy Production in Stars*, Phys. Rev. 55, 434 (1939).
- [12] D. D. Clayton, *Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis*, McGraw-Hill 1968.
- [13] H. Drozdowski, *Fizyczny Obraz Świata*, Wydawnictwo Naukowe UAM 2007.
- [14] H. Drozdowski, *O pochodzeniu pierwiastków*, wykład habilitacyjny na Wydziale Fizyki UAM 24-05-2002 [w]: archiwum CKK.